

**UNESP**  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUISTA FILHO”**  
**CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**PAULO ROBERTO GOMES ALVES**

**ANÁLISE DO ACABAMENTO SUPERFICIAL E DA POTÊNCIA CONSUMIDA  
NA USINAGEM DE FRESAMENTO FRONTAL E CILÍNDRICO TANGENCIAL DA  
MADEIRA DE EUCALIPTO**

Guaratinguetá - SP  
2016

PAULO ROBERTO GOMES ALVES

ANÁLISE DO ACABAMENTO SUPERFICIAL E DA POTÊNCIA CONSUMIDA NA  
USINAGEM DE FRESAMENTO FRONTAL E CILÍNDRICO TANGENCIAL DA MADEIRA  
DE EUCALIPTO

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia  
do Campus de Guaratinguetá Universidade  
Estadual Paulista, como parte dos requisitos  
para a obtenção do título de Doutor em  
Engenharia Mecânica na Área de Materiais.

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

Guaratinguetá – SP  
2016

A474a Alves, Paulo Roberto Gomes  
Análise do acabamento superficial e da potência consumida na usinagem de fresamento frontal e cilíndrico tangencial da madeira de eucalipto / Paulo Roberto Gomes Alves – Guaratinguetá, 2016.  
129 f. : il.  
Bibliografia : f. 116-123

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.  
Orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves  
Coorientador: Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves

1. Trabalhos em madeira 2. Usinagem 3. Madeira - Superfícies 4. Fresadoras I. Título

CDU 674(043)

**PAULO ROBERTO GOMES ALVES**

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

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri  
Vice-Coordenador

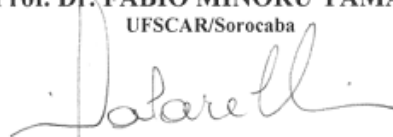
**BANCA EXAMINADORA:**



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



Prof. Dr. FABIO MINORU YAMAJI  
UFSCAR/Sorocaba



Prof. Dr. IVALDO DE DOMÊNICO VALARELLI  
UNESP/FEB



Prof. Dr. MARCOS VALERIO RIBEIRO  
UNESP/FEG



Prof. Dr. JOSÉ VITOR CANDIDO DE SOUZA  
UNESP/FEG

*Fevereiro de 2016*

## **DADOS CURRICULARES**

### **PAULO ROBERTO GOMES ALVES**

NASCIMENTO	02.10.1977 – ITAPEVA / SP
FILIAÇÃO	Hubtemberg Alves Rita de Cássia Gomes
1993/1996	Técnico em Eletrotécnica – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza Itapeva/SP.
1998/2003	Curso de Graduação em Física – Universidade Estadual Paulista Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE), Campus de Rio Claro.
2011/2012	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2012/2016	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

A minha família, às minhas filhas Livia Benfica Gomes Alves e Tajylla Gabriela de Souza aos meus Pais e à minha esposa Cristiane Aparecida Benfica Alves, que sempre me incentivaram a continuar meus projetos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela minha vida, minha família e meus amigos.

Aos meus orientadores, *Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves* e *Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves*, que sempre me incentivaram e que sem esta orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

Ao *prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein* do Campus da UNESP de Guaratinguetá pela colaboração na geração das imagens de microscopia eletrônica de varredura (Mev).

A meu pai *Hubtemberg Alves (in memorium)* e a minha mãe *Rita de Cássia Gomes*, pela dedicação na minha educação e formação como cidadão.

Aos técnicos de laboratório *David José Tenório de Aquino*, *Juliano Rodrigo Brito* e *Tiago Matos Andres* do Campus da UNESP de Itapeva, pela experiência técnica, apoio e dedicação exemplar.

Ao amigo *Cleverson Pinheiro*, que despendeu seu tempo para colaborar com o presente trabalho e a todos os colegas da UNESP – Campus de Itapeva/SP, sempre me incentivando a prosseguir nos estudos.

Aos funcionários da UNESP, das Unidades Universitárias de Itapeva e de Guaratinguetá pelo apoio irrestrito nesta caminhada.

Aos professores titulares e suplentes nas bancas de qualificação e de exame da Tese: *Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves*, *Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji*, *Prof. Dr. Ivaldo De Domênico Valarelli*, *Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro* e *Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza*, pela contribuição ao discutir e avaliar esta Tese.

“O que observamos em corpos materiais  
e as forças não são nada mais que  
formas e variações na  
estrutura do  
espaço.”

Erwin Schrödinger

ALVES, P.R.G. **Análise do Acabamento Superficial e da Potência Consumida na Usinagem de Fresamento Frontal e Cilíndrico Tangencial da Madeira de Eucalipto.** 2016. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 2016.

## RESUMO

A expansão tecnológica e de mercado da madeira e produtos derivados de madeira industrializada, fazem com que as pesquisas dos processos que envolvem esse material sejam cada vez mais necessárias. O fresamento é um processo de usinagem muito utilizado na indústria, quando se pretende obter um acabamento superficial de qualidade. O presente trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho do processo de usinagem de madeiras das espécies de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*, realizado em centro de usinagem CNC, através da análise do acabamento superficial e da potência consumida em operações de fresamento frontal e cilíndrico tangencial. As madeiras foram usinadas de forma tangencial em movimentos concordante e discordante, com profundidade de corte ( $a_p$ ) de 1,0 mm; de forma frontal nas direções perpendicular e paralelo em relação às fibras com ( $a_p$ ) de 5,0 mm. Como condições de usinagem, empregaram-se quatro velocidades de corte ( $V_c$ ) 5,9; 8,4; 10,9; 13,4 m/s, e quatro velocidades de avanço ( $V_f$ ) 3,0; 5,0; 7,0 e 9,0 m/min. Utilizou-se para os ensaios uma fresa helicoidal de metal duro maciço com três dentes e diâmetro de 16,0 mm. Foram analisados os resultados de Rugosidade Média ( $R_a$ ) obtidos através de rugosímetro e potência consumida captada por sensor de efeito Hall, e verificado a integridade das superfícies fresadas através de microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os resultados foram analisados pelo software Minitab e tratados estatisticamente através da análise de variância ANOVA e teste de Tukey. Concluiu-se que as melhores qualidades superficiais registradas ocorreram para as menores velocidades de avanço, maiores velocidades de corte, no fresamento tangencial para o corte discordante, no fresamento frontal para o corte paralelo às fibras da madeira. Para a potência média consumida, o menor valor médio ocorreu para as maiores velocidades de corte e a espécie *citriodora*, obteve melhor qualidade superficial quando comparado com a espécie *saligna*.

**PALAVRAS-CHAVE:** Qualidade superficial. Fresamento concordante. Fresamento discordante. Velocidade de avanço. Velocidade de corte.

ALVES, P.R.G. **Analysis of Surface Finish and Consumed Power on the front and Milling Machining of Cylindrical Tangential of Eucalyptus wood.** 2016. 129 f. Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Univ: Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 2016.

### ABSTRACT

The technological expansion and market wood and derived from wood products industrialized make research processes involving this material are increasing necessary. Milling is a machining process commonly used in the industry, when applying for a surface finish quality. This study was to evaluate the performance of wood machining process of species *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus saligna* realized out in CNC machining center, through the analysis of surface finish and the power consumed in tangential front and cylindrical milling operations. The woods were used tangentially on down-milling and up-milling movements, cutting depth of 1.0 mm; the front in parallel and perpendicular directions in relation to the fibers with cutting depth of 5.0 mm. As machining conditions, we used four cutting speeds of 5.9, 8.4, 10.9 and 13.4 m/s, and four feed speeds 3 5, 7 and 9 m/min. It was used for testing a helical cutter solid tungsten carbide tool with three teeth and diameter of 16 mm. The results were analyzed Roughness Average ( $R_a$ ) obtained from roughness and power consumed captured by Hall effect sensor and the integrity of the machined surfaces obtained by scanning electron microscope. These results were analyzed by Minitab software and statistically analyzed by ANOVA and Tukey test. It is concluded that the best recorded surface qualities were obtained for lower feed rates, higher cutting speeds, the tangential milling cutting for up-milling in front for cutting parallel to the wood fibers. For the average power consumed, the lowest average value occurred for higher cutting speeds and the species *citriodora*, obtained better surface quality when compared with the species *saligna*.

**KEYWORDS:** Surface quality. Down-milling. Up-milling. Feed rate. Cutting speed.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diferentes escalas de observação do material de madeira.....	20
Figura 2 - Esquema representativo da estrutura celular do lenho de conífera.....	21
Figura 3 - Esquema representativo da estrutura celular do lenho de folhosas .....	22
Figura 4 - Ilustração dos três planos referenciais de um tronco de madeira, xy-transversal, xz-radial e yz-tangencial.....	23
Figura 5 - Composição do caule em seção transversal. ....	24
Figura 6 – Evolução de área de árvores plantadas (milhões (ha))......	27
Figura 7- Formas de água existentes na madeira.....	33
Figura 8 – Os três eixos principais da madeira com relação à direção da grã e anéis de crescimento.....	35
Figura 9 - Sistemas de corte com relação à seção transversal da madeira. ....	38
Figura 10 – Avanço por dente ( $f_z$ ), avanço de corte ( $f_c$ ) e avanço efetivo ( $f_e$ ) no fresamento discordante.....	40
Figura 11 - Fresamento frontal. ....	42
Figura 12 - Geometria do fresamento concordante .....	43
Figura 13 - Fresamento discordante. ....	44
Figura 14 - Ponto de impacto diferente saindo da ferramenta quando discordante ou concordante. Ângulo de trabalho $\varphi_{Sup}$ para a técnica discordante e $\varphi_{Sdown}$ para a técnica concordante.....	45
Figura 15- Ângulos relativos entre a inclinação da face e grã no nível máximo de espessura do cavaco quando discordante ou concordante com 0,5 mm e 1,5 mm de $a_p$ de 40 mm. ....	45
Figura 16 - Velocidade de avanço ( $V_f$ ), Velocidade de corte ( $V_c$ ) e Profundidade de corte ( $a_p$ )..	48
Figura 17 - Representação gráfica de uma superfície, mostrando os picos e vales de cada parte da medição, na determinação do $R_y$ . ....	54
Figura 18 - Rugosidade média $R_a$ ; $y_i$ é o valor de um pico ou vale.....	56
Figura 19 - Orientação da grã e amostra tangencial, a face mais escura é a face que foi usinada.	57
Figura 20 - Rede hexagonal de átomos de boro na matriz de titânio. ....	63
Figura 21 - Detalhe de medição da umidade em peça de madeira de <i>Eucalyptus</i> após secagem por ventilação forçada. (teor de umidade registrado de 10,8 % $\pm$ 4%). ....	67
Figura 22 - Esquema da estrutura da máquina CNC. ....	68
Figura 23 - (a) Unidade de operação, (b) Mandril, (c) Dispositivo lateral de 10 posições e (d) CDP fixado nas ventosas pneumáticas. ....	69
Figura 24 – Fresa de topo com três arestas de corte em hélice de metal duro para acabamento. .	69
Figura 25 – a) Indicação do fresamento tangencial concordante e discordante, nas laterais da amostra assim como em suas extremidades. b) Indicação do $F_{pa}$ e $F_{pp}$ às fibras da madeira. ...	71
Figura 26 - a) CDPs usinados em serra seccionadora TECMATIC e b) CDP retirado.....	73
Figura 27 – CDPs retirados para medida de $R_a$ , concordante e discordante. ....	73
Figura 28 – Retirada dos CDP para medida de $R_a$ , frontal.....	74
Figura 29 - a) Haste de medição e b) Detalhe de uma medição realizada com o Rugosímetro. ...	75
Figura 30 - Medida no fresamento frontal paralelo às fibras. ....	75
Figura 31 - Medida no fresamento frontal perpendicular às fibras. ....	76
Figura 32- Fresamento tangencial concordante e discordante perpendicular às fibras. ....	76
Figura 33 - Fresamento tangencial concordante paralelo às fibras. ....	77
Figura 34 - Fresamento tangencial discordante paralelo às fibras.....	77

Figura 35 – a) Computador para armazenar e adquirir os dados, b) módulo de canais da marca National Instruments modelo BNC-2120, c) sensor de efeito Hall da marca LEM, modelo AT 5 B10. d) Aplicativo para aquisição de dados desenvolvidos LABVIEW versão 7.1. ....	78
Figura 36 - Microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO LS-15. ....	80
Figura 37 – Interação para $R_a$ em função da madeira (M), rotação (S), sentido de medição (SM) e Sentido de corte (SC).....	82
Figura 38 – Efeitos de $R_a$ em função da Madeira (M), Rotação (S), Sentido de medição (SM), e Sentido de Corte (SC).....	83
Figura 39 – Interação da Potência para as madeiras (M), rotação (S) e os tipos de corte (TC). .	84
Figura 40 - Principais efeitos para a Potência em função da madeira (M), rotação (S) e tipo de corte (TC). ....	85
Figura 41 – Interações para $R_a$ entre as madeiras (M), velocidade de avanço ( $V_f$ ), sentido de medição (SM) e sentido de corte (SC).....	86
Figura 42 – Efeitos para $R_a$ em função da madeira (M), velocidade de avanço ( $V_f$ ), sentido de medição (SM) e sentido de corte (SC).....	87
Figura 43 – Interação para rugosidade média $R_a$ entre as madeiras (M), velocidade de avanço ( $V_f$ ) e tipo de corte (TC).....	88
Figura 44 - Efeitos para a potência em função da madeira (M), velocidade de avanço ( $V_f$ ) e tipo de corte (TC).....	89
Figura 45 – Média de $R_a$ para Fpa e Fpp às fibras, a) <i>citriodora</i> , b) <i>saligna</i> ) para $V_c = 10,9$ m/s. 91	
Figura 46 - Potência consumida no Fpa e Fpp, a) <i>citriodora</i> , b) <i>saligna</i> , para $V_c = 10,9$ m/s.....	93
Figura 47 - Média de $R_a$ nos fresamentos TCF, TDF, TDC e TCC; a), b) <i>citriodora</i> e c), d) <i>saligna</i> ; $V_c = 10,9$ m/s. ....	95
Figura 48 – Média de $R_a$ no fresamento tangencial (Con.) e (Dis.), a) <i>citriodora</i> e b) <i>saligna</i> . ...	97
Figura 49 - Gráfico da potência consumida no fresamento TC, TD, TBC e TBD para as espécies: a) <i>citriodora</i> e b) <i>saligna</i> . ....	99
Figura 50 - Média de $R_a$ no fresamento Fpa e Fpp às fibras;a) <i>citriodora</i> e b) <i>saligna</i> e $V_f = 5$ m/min.....	101
Figura 51 - Gráfico da potência consumida no Fpa e Fpp, a) <i>citriodora</i> e b) <i>saligna</i> , para $V_f = 5$ m/min.....	103
Figura 52 – Média de $R_a$ nos cortes TCF, TCC, TDF e TDC;a), b) <i>citriodora</i> e c), d) <i>saligna</i> , para $V_f = 10,9$ m/min.....	105
Figura 53 - Fresamento TBC e TBD perpendicular às fibras, a) <i>citriodora</i> e b) <i>saligna</i> , para $V_f = 5$ m/min.....	107
Figura 54 - Gráfico da potência consumida nos TC, TD, TBC e TBD; a) <i>citriodora</i> e b) <i>saligna</i> , para $V_f = 5$ m/min.....	109
Figura 55 – MEV: <i>citriodora</i> concordante $V_f = 3$ m/min, $V_c$ de 10,9 m/s e $a_p = 1$ mm.....	110
Figura 56 - MEV: <i>citriodora</i> discordante $V_f = 3$ m/min, $V_c$ de 10,9 m/s e $a_p = 1$ mm. ....	110
Figura 57 – MEV: <i>citriodora</i> concordante $V_f = 9$ m/min, $V_c$ de 10,9 m/s e $a_p = 1$ mm.....	111
Figura 58 – MEV: <i>citriodora</i> discordante $V_f = 9$ m/min, $V_c$ de 10,9 m/s e $a_p = 1$ mm.....	111
Figura 59 – MEV: <i>saligna</i> concordante $V_f = 3$ m/min, $V_c$ de 10,9 m/s e $a_p = 1$ mm. ....	112
Figura 60 - MEV: <i>saligna</i> discordante $V_f = 3$ m/min, $V_c$ de 10,9 m/s e $a_p = 1$ mm.....	112
Figura 61 - MEV: <i>saligna</i> concordante $V_f = 9$ m/min, $V_c$ de 10,9 m/s e $a_p = 1$ mm. ....	113
Figura 62 - MEV: <i>saligna</i> discordante $V_f = 9$ m/min, $V_c$ de 10,9 m/s e $a_p = 1$ mm.....	113

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Média da composição química da madeira de coníferas e folhosas.....	25
Quadro 2	Consumo brasileiro de madeira <i>in natura</i> para uso industrial por segmento e gênero, 2013.....	26
Quadro 3	Parâmetros utilizados nos ensaios de usinagem.....	70
Quadro 4	Total de ensaios realizados conforme os parâmetros utilizados no fresamento...	72
Quadro 5	Parâmetros calculados no Minitab para $R_a$ , com a denominação numeral.....	82
Quadro 6	Parâmetros calculados no Minitab para potência, com a denominação numeral.	84
Quadro 7	Parâmetros calculados no Minitab para $R_a$ com a denominação numeral.....	86
Quadro 8	Parâmetros calculados no Minitab para potência, com a denominação numeral.	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Densidades aparente das espécies <i>Corymbia citriodora</i> e <i>Eucalyptus saligna</i> .....	81
Tabela 2 – Média de $R_a$ para a madeira <i>citriodora</i> e <i>saligna</i> no Fpa e Fpp às fibras, para $V_c = 10,9$ m/s. ....	90
Tabela 3 - Potência consumida no Fpa e Fpp às fibras para $V_c = 10,9$ m/s. ....	92
Tabela 4 – Média de $R_a$ , <i>citriodora</i> e <i>saligna</i> no fresamento TCF, TCC, TDF e TDC; para $V_c = 10,9$ m/s. ....	94
Tabela 5 – Valores de $R_a$ para a madeira <i>citriodora</i> e <i>saligna</i> no fresamento concordante, discordante e das bordas, para $V_c = 10,9$ m/s. ....	96
Tabela 6 – Potência média consumida no fresamento TC, TD, TBC e TBD para $V_c 10,9$ m/s. ....	98
Tabela 7 – Média de $R_a$ para as madeiras <i>citriodora</i> e <i>saligna</i> no Fpa e Fpp para $V_f 5$ m/min. .	100
Tabela 8 - Potência consumida no Fpa e Fpp às fibras para $V_f 5$ m/min. ....	102
Tabela 9 – Média de $R_a$ para <i>citriodora</i> e <i>saligna</i> no fresamento TCF, TCC, TDF e TDC, para $V_f = 5$ m/min. ....	104
Tabela 10 – Média de $R_a$ para a madeira <i>citriodora</i> e <i>saligna</i> no fresamento TBC e TBD, para $V_f 5$ m/min. ....	106
Tabela 11 - Dados da potência consumida nos TC, TD, TBC e TBD, para $V_f = 5$ m/min. ....	108

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
CDP	Corpo de Prova
CDPs	Corpos de Prova
CNC	Comando Numérico Computadorizado
EN	European Committee for Standardization
Fpa	Fresamento frontal paralelo às fibras da madeira
Fpp	Fresamento frontal perpendicular às fibras da madeira
IBÁ	Indústria Brasileira de árvores
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira Registrada
TBC	Fresamento tangencial da borda concordante
TBD	Fresamento tangencial da borda discordante
TC	Fresamento tangencial concordante
TD	Fresamento tangencial discordante
TCC	Fresamento tangencial concordante medido contrário ao corte
TDC	Fresamento tangencial discordante medido contrário ao corte
TDF	Fresamento tangencial discordante medido a favor o corte
TCF	Fresamento tangencial concordante medido a favor o corte

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_p$	Profundidade de corte
$i$	Corrente alternada
$l_e$	Comprimento de amostragem (cut-off ou $\lambda_c$ )
$l_m$	Comprimento de medição
$R_a$	Rugosidade média
$R_t$	Rugosidade total
$S$	Rotação (rpm)
$U$	Tensão elétrica
$U_{cc}$	Tensão elétrica de corrente contínua
$V_f$	Velocidade de avanço
$V_c$	Velocidade de corte
$W$	Potência

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	18
1.2. OBJETIVO GERAL .....	19
1.2.2. Objetivos específicos .....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	20
2.1. CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA.....	20
2.1.1. Anatomia da Madeira .....	21
2.1.2. Anatomia das Coníferas .....	21
2.1.3. Anatomia das Folhosas .....	22
2.1.4. Propriedade das estruturas da Árvore .....	22
2.1.5. Química da Madeira.....	25
2.1.6. O gênero Eucalipto.....	26
2.1.7. Usinabilidade da madeira de eucalipto.....	28
3. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA .....	30
3.1. DENSIDADE .....	30
3.1.2. Umidade da madeira .....	31
3.1.3. Estabilidade dimensional da madeira.....	34
3.1.4. Propriedades mecânicas .....	35
3.2. FUNDAMENTOS DA USINAGEM DA MADEIRA .....	37
3.2.1. Sistemas de Corte .....	37
3.2.2. O Processo de Usinagem.....	38
3.2.3. Fresamento .....	39
3.2.4. Fresamento frontal.....	41
3.2.5. Fresamento cilíndrico tangencial ou periférico .....	42
3.2.6. Fresamento concordante.....	43
3.2.7. Fresamento discordante.....	43
3.2.8. Estudos do fresamento concordante e discordante no material madeira.....	44
3.2.9. Movimentos entre a peça de trabalho e a aresta cortante .....	46
3.2.10. Velocidade de corte ( $V_c$ ), de avanço ( $V_f$ ) e profundidade de usinagem ( $a_p$ ).....	47
3.3. QUALIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA.....	49
3.3.1. Acabamento superficial.....	49
3.3.2. Medição da rugosidade.....	52
3.3.3. Usinagem da madeira à CNC .....	57
3.3.4. Materiais para ferramentas de corte .....	59
3.3.5. Potência consumida na usinagem.....	64
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	67
4.1. ORIGEM DA MADEIRA PARA OS TESTES E A FRESADORA CNC .....	67
4.1.1. Densidade Aparente das Madeiras .....	67
4.1.2. Fresadora CNC .....	68
4.1.3. Dispositivos utilizados na fresadora .....	68
4.1.4. Ferramenta utilizada.....	69
4.1.5. Parâmetros de usinagem .....	70
4.2. EQUIPAMENTO E METODOLOGIA DE RUGOSIDADE.....	75
4.2.1. Medida de $R_a$ no fresamento frontal paralelo às fibras .....	75
4.2.2. Medida de $R_a$ no fresamento frontal perpendicular às fibras .....	76

4.2.3. Medida de $R_a$ no fresamento tangencial concordante e discordante perpendicular às fibras da madeira.....	76
4.2.4. Medida de $R_a$ no fresamento tangencial concordante paralelo às fibras.....	77
4.2.5. Medida no fresamento tangencial discordante paralelo às fibras.....	77
4.3. POTÊNCIA DE CORTE CONSUMIDA.....	78
4.4. ANÁLISE DAS IMAGENS.....	80
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81
5.1. DENSIDADE APARENTE.....	81
5.2. ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL ( $R_a$ ) E POTÊNCIA CONSUMIDA.....	81
5.2.1. Fresamento tangencial concordante e discordante para $V_f = 5$ m/min.....	81
5.2.2. Análise de Potência Consumida para $V_f = 5$ m/min no fresamento tangencial concordante e discordante.....	83
5.2.3. Análise da qualidade superficial para $V_c = 10,9$ m/s no fresamento tangencial concordante e discordante.....	85
5.2.4. Análise da Potência para $V_c = 10,9$ m/s no fresamento tangencial concordante e discordante.....	88
5.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DO EFEITO DA $V_f$ .....	90
5.3.1. Fresamento Fpa e Fpp às fibras para $V_c = 10,9$ m/s.....	90
5.3.2. Potência consumida no fresamento Fpa e Fpp às fibras.....	92
5.3.3. Fresamento TCF, TCC, TDF e TDC.....	94
5.3.4. Fresamento tangencial concordante, discordante e das bordas perpendicular às fibras.....	96
5.3.5. Potência consumida no fresamento TC, TD, TBC e TBD.....	98
5.4. EFEITOS DA VARIAÇÃO DA $V_c$ .....	100
5.4.1. Fresamento Frontal paralelo e perpendicular às fibras para $V_f = 5$ m/min.....	100
5.4.2. Potência consumida no fresamento Fpa e Fpp.....	102
5.4.3. Fresamento e tangencial concordante e discordante (F) e (C).....	104
5.4.4. Fresamento TBC e TBD perpendicular às fibras.....	106
5.4.5. Potência consumida no fresamento TC, TD, TBC e TBD.....	108
5.5. ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DA MADEIRA NO (MEV).....	110
5.5.1. Fresamento tangencial concordante e discordante para a espécie <i>citriodora</i> .....	110
5.5.2. Fresamento tangencial concordante e discordante para a espécie <i>saligna</i> .....	112
6. CONCLUSÃO.....	115
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116
APÊNDICES: A, B, C, D, E e F.....	124

## 1. INTRODUÇÃO

Vive-se numa época em constante evolução e os avanços em tecnologia se tornam ainda mais evidentes. As indústrias buscam produção mais limpa, maior produtividade, minimização de custos e tempos, com melhorias na qualidade dos produtos.

Na indústria madeireira cada vez mais se requer precisão e qualidade, utilizando-se de tecnologias para obter os resultados esperados de produção e qualidade em seus produtos, desde o desdobro de toras até o beneficiamento final.

Das inovações, a usinagem, é uma das mudanças dentre os processos, pois é nítida a mudança de máquinas antes operadas manualmente, por máquinas automáticas, produzindo melhores qualidades superficiais das peças usinadas em menos tempo, com alta precisão e sem riscos aos operadores.

A constante ampliação em fresamento, das máquinas a Comando Numérico Computadorizado (CNC) é explicada pelos níveis de acabamento e a possibilidade de geometrias diferentes e complexas.

A partir da década de 80 as evoluções dos materiais de ferramentas de corte e das máquinas permitiram o corte a altas velocidades na indústria. O principal fator que estimulou o desenvolvimento do fresamento foi a redução nos tempos de fabricação, seja do próprio processo de fresamento como de processos de acabamento subsequentes. O fresamento tornou possível o uso de ferramentas de pequeno diâmetro e a obtenção de geometrias mais próximas da geometria final da peça.

Uma das alternativas para essa solicitação foi a implantação de máquinas CNC. Dentre as etapas de produção de móveis, a que mais recebeu auxílio foi a área da usinagem da madeira, fabricando os mais complexos tipos de peças, trazendo qualidade aos cortes, precisão, flexibilidade e diminuição de tempo.

## 1.1. OBJETIVOS

O presente trabalho teve por objetivos, analisar o acabamento superficial e a potência consumida no processo de fresamento da madeira de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna* em centro de usinagem CNC, utilizando uma fresa helicoidal de metal duro no fresamento frontal e cilíndrico tangencial concordante e discordante para diferentes condições de usinagem e parâmetros de corte.

## 1.2. OBJETIVO GERAL

Estudar os efeitos no fresamento tangencial da madeira de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna* em centro de usinagem a Comando Numérico Computadorizado (CNC), usando ferramenta de metal duro, analisando a qualidade superficial e a potência consumida no processo.

### 1.2.2. Objetivos específicos

O objetivo foi avaliar a influência dos seguintes fatores de entrada (sentido de usinagem e os parâmetros de velocidade de corte e avanço), e suas interações, na usinagem da madeira por fresamento:

- Fresamento tangencial nos sentidos de corte concordante e discordante;
- Fresamento frontal nos sentidos de corte paralelo e perpendicular às fibras;
- Apontar as melhores combinações das variáveis de entrada que proporcionem melhor qualidade superficial com a menor variabilidade do processo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

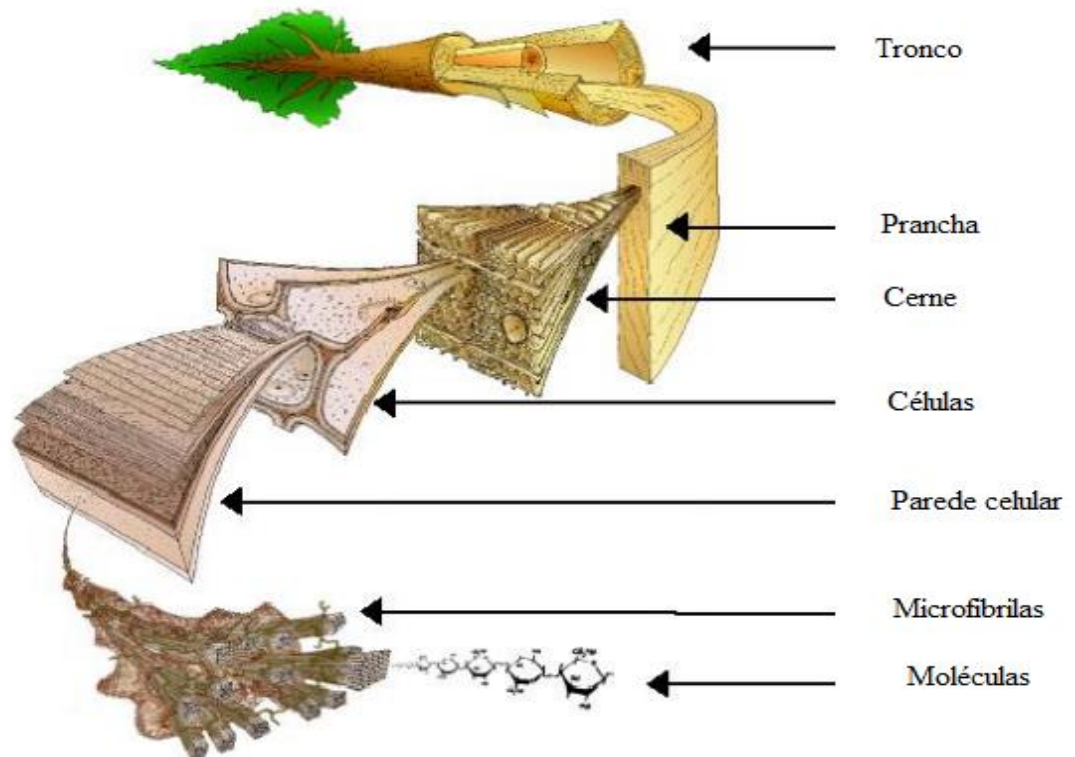
A revisão bibliográfica apresenta-se separada por assuntos principais, quais sejam: as características e propriedades da madeira, o processo de usinagem, a qualidade superficial e medição da rugosidade e por fim sobre a usinagem à comando numérico computadorizado (CNC).

### 2.1. CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA

A madeira é um material orgânico, sólido, de composição complexa, onde predominam as fibras de celulose e hemicelulose unidas por lignina. Possui a característica de absorção da água (higroscopia) e apresenta propriedades físicas diferentes consoantes a orientação espacial (anisotrópica ou ortotrópica). O caule é a parte da árvore de maior interesse comercial, pois nele está o lenho que tem diversas aplicações comerciais como produção de celulose e papel, biomassa, construção civil e mobiliário (GONÇALVES, 2000).

A diferente escala de observação do material de madeira está ilustrada na Figura 1.

Figura 1- Diferentes escalas de observação do material de madeira.



### 2.1.1. Anatomia da Madeira

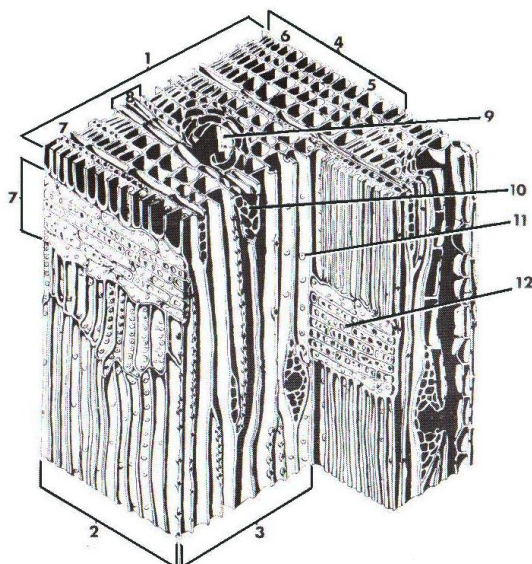
Costa, 2001 comenta que o termo anatomia vem de anatomé que quer dizer dissecação, corte. A Anatomia da Madeira é o ramo da ciência botânica que se ocupa do estudo das variadas células que compõem o lenho, bem como sua organização, função e relação com a atividade biológica do vegetal. A anatomia constitui-se de elemento fundamental para qualquer emprego industrial que se pretenda destinar à madeira. O comportamento mecânico da madeira (secagem, colagem de peças, trabalhabilidade e outros) está intimamente associado a sua estrutura celular. Através da anatomia é possível diferenciar espécies, identificando corretamente a madeira.

As madeiras podem ser agrupadas em duas categorias distintas: moles, *softwoods* ou coníferas; grupo das gimnospermas, exemplo: *pinus*, *araucária*. E duras, *hardwoods* ou folhosas; grupo das angiospermas dicotiledôneas exemplo: *imbuia*, *ipê*, *eucalyptus*.

### 2.1.2. Anatomia das Coníferas

O lenho das coníferas pode ser considerado homogêneo, pois é constituído apenas por células de parênquima, canais de resina e 93% do lenho por traqueídes, são fibras responsáveis pela condução de água e nutrientes através das chamadas pontoações areoladas, e também pela sustentação, pois são dispostos no lenho, lado a lado formando o lenho, como pode ser observado na Figura 2, (BODIG; JAYNE, 1982).

Figura 2 - Esquema representativo da estrutura celular do lenho de conífera



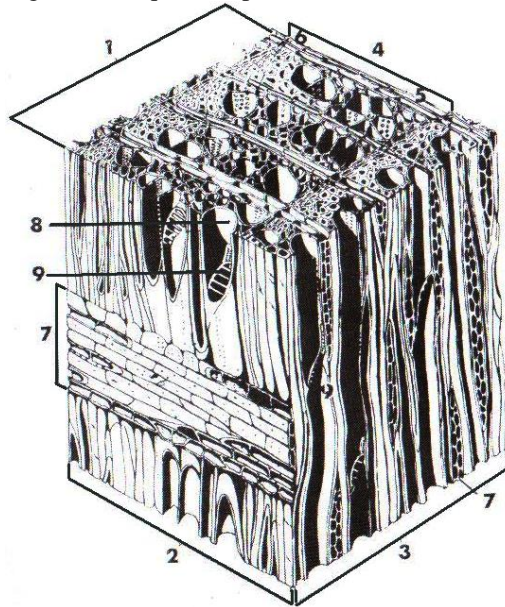
- (1) seção transversal,
- (2) seção radial,
- (3) seção tangencial,
- (4) anéis de crescimento,
- (5) lenho inicial,
- (6) lenho tardio,
- (7) raios,
- (8) raios fusiformes,
- (9) canal de resina vertical,
- (10) canal de resina horizontal,
- (11) pontoação,
- (12) pontoação.

Fonte: BODIG; JAYNE, 1982.

### 2.1.3. Anatomia das Folhosas

A organização celular de uma folhosa típica é mostrado na Figura 3, em contraste com as coníferas, folhosas, são constituídas quase inteiramente de fibras e vasos. (BODIG; JAYNE, 1982).

Figura 3 - Esquema representativo da estrutura celular do lenho de folhosas



- (1) seção transversal,
- (2) seção radial,
- (3) seção tangencial,
- (4) anéis de crescimento,
- (5) lenho inicial,
- (6) lenho tardio,
- (7) raios,
- (8) vasos,
- (9) pontoações.

Fonte: BODIG; JAYNE, 1982.

### 2.1.4. Propriedade das estruturas da Árvore

O caule é a parte da árvore de maior interesse comercial, pois nele está o lenho que tem diversas aplicações comerciais como produção de celulose e papel, biomassa, construção civil e mobiliário. A função do caule em uma árvore é a sustentação da copa e o transporte e armazenamento de nutrientes (GONÇALVES, 2000).

Quando observamos o caule em corte transversal, podemos observar as regiões com funções específicas na sequência de fora para dentro sendo a casca, câmbio, xilema (composto por albino e cerne) e a medula (PFEIL; PFEIL, 2003).

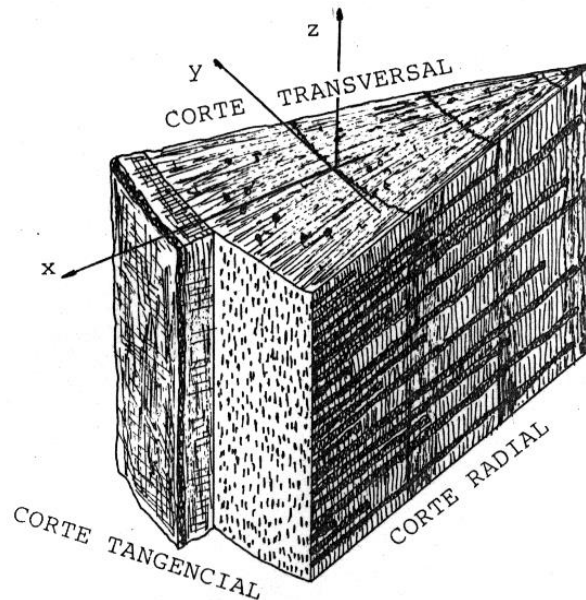
A madeira é um material tridimensional e sua anatomia pode ser melhor descrita através de observações em três seções ou superfícies de corte, sendo elas:

Seção transversal: plano de corte normal ao eixo do tronco.

Seção tangencial: plano de corte da madeira no sentido de crescimento axial, perpendicular ao raio do tronco e, ainda, tangencial às camadas ou anéis de crescimento.

Seção radial: plano de corte da madeira no sentido de crescimento axial passando pelo eixo do tronco e, perpendicular às camadas de crescimento. A Figura 4 ilustra as três seções de corte da madeira (GONÇALVES, 2000).

Figura 4 - Ilustração dos três planos referenciais de um tronco de madeira, xy-transversal, xz-radial e yz-tangencial.



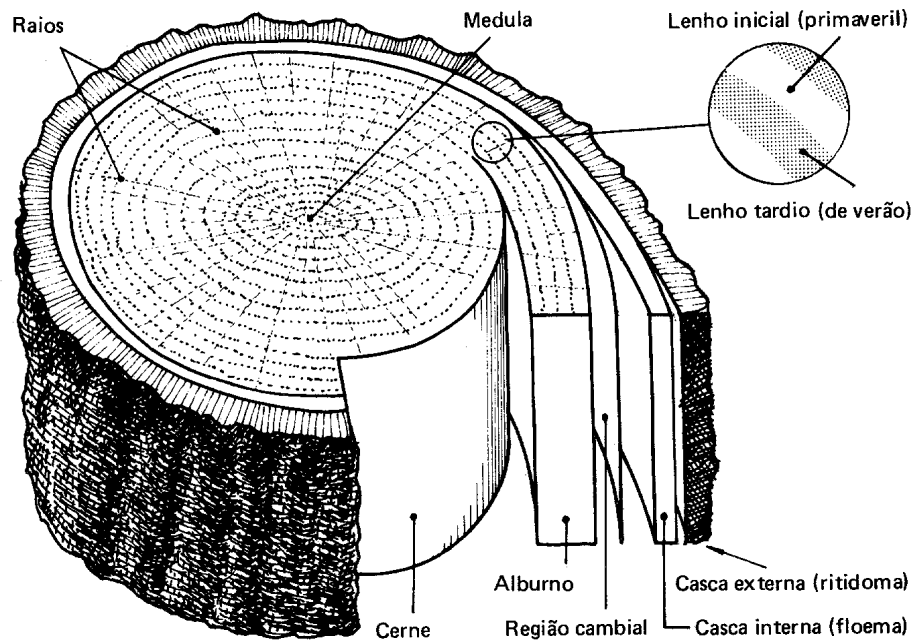
Fonte: Adaptado de KOLLMANN, F., 1959.

A casca apresenta funções apenas durante o desenvolvimento da árvore e não interfere nas propriedades do lenho disponível para ser usinado, sendo na maioria das vezes retirado do fuste (BURGER; RICHTER, 1991).

Gonçalves (2000) comenta que a casca tem como função proteger o xilema de choques mecânicos, combustão, intempéries e ataques biológicos. O câmbio é uma camada de células meristemáticas responsáveis pelo crescimento longitudinal do fuste. Estas células se dividem formando novas células de xilema. O câmbio não interfere nas propriedades da madeira depois de colhida, apenas durante seu desenvolvimento. O xilema é a região mais interessante da árvore quando se trata de usinagem, pois é composta pela maior parte do lenho disponível para utilização comercial. A árvore tem em cada trecho do tronco uma primeira fase de crescimento axial. Seguindo ano após ano a formação de camadas radiais, visto que o tronco deve sustentar a copa e nutri-la através das camadas periféricas que transportam a seiva bruta das raízes às folhas

da árvore. Ao examinarmos a seção transversal produzida num tronco de uma conífera ou de uma dicotiledônea, se observa da extremidade para o centro a seguinte configuração, conforme ilustrado na Figura 5: casca externa propriamente dita (ritidoma); casca interna ou líber (floema); câmbio, capa delgada de células vivas responsáveis pelo crescimento radial e axial da árvore; estrutura lenhosa (lenho) que preenche a maior parte do tronco, constituída pelo alburno (xilema) e cerne respectivamente; medula e raios medulares.

Figura 5 - Composição do caule em seção transversal.



Fonte: Adaptado de WHITE, M.S. apud CHIMELO, J.P., 1986.

O cerne possui células fisiologicamente mortas, as quais já não exercem função no desenvolvimento da árvore, ficando com a função de sustentação (BURGER; RICHTER, 1991).

O alburno é a região em que o xilema possui células fisiologicamente ativas, com as funções de armazenamento e condução de nutrientes na árvore. Trata-se de uma região muito suscetível ao ataque biológico de fungos e bactérias por armazenar nutrientes. A medula é formada por células meristemáticas primárias, está localizada bem ao centro do caule estendendo-se deste o topo até a base do fuste. Sua quantidade de madeira é insignificante comercialmente e importante apenas durante o desenvolvimento da árvore (GONÇALVES, 2000).

### 2.1.5. Química da Madeira

Em relação à composição química elementar da madeira, pode-se afirmar que não há diferenças consideráveis, levando-se em conta as madeiras de diversas espécies. Os principais elementos existentes são o Carbono (C), Hidrogênio (H), Oxigênio (O) e Nitrogênio (N) em pequenas quantidades. Estes elementos formam as denominadas estruturas macromoleculares Celulose, Hemicelulose e Lignina, que juntas constituem a parede celular. Outras substâncias minerais como Cálcio, Potássio e Magnésio, são encontradas em pequenas quantidades e são denominados de extrativos (KLOCK; et al., 2005).

As composições químicas das madeiras de folhosas e coníferas variam consideravelmente entre uma espécie e outra, conforme pode ser observado no Quadro 1.

Quadro 1 - Média da composição química da madeira de coníferas e folhosas.

Componentes	Coníferas	Folhosas
Celulose	42%	47%
Hemicelulose	25%	30%
Lignina	28%	20%
Extrativo	5	3

Fonte: KLOCK; et al., 2005.

A celulose pode ser brevemente definida como um polímero linear de alto peso molecular, constituído por cadeias de glicose, organizada e parcialmente cristalina. É responsável pela constituição de quase a metade de toda a madeira de folhosas e coníferas, pois tem como função constituir a parede celular dos vegetais (KLOCK; et al., 2005).

As hemiceluloses tem função estrutural parecida com a da celulose, são constituídas de estruturas ramificadas amorfas, sendo encontradas em dois principais tipos, as xilanas e glucomananas (GONÇALVES, 2000).

A lignina destaca-se pela função de ligar com rigidez uma célula à outra como um "agente cimentante", é definida como um polímero aromático, heterogêneo, ramificado e amorfo (KLOCK; et al., 2005).

### 2.1.6. O gênero Eucalipto

O gênero *Eucalyptus* pertence à família Myrtaceae, da classe das angiospermas dicotiledôneas, contando com cerca de 672 espécies, a maior parte originária da Austrália. Atualmente existe um grande interesse nos materiais extraídos de recursos vegetais renováveis. Não somente do ponto de vista da atividade econômica, mas também da manutenção do equilíbrio ecológico que esses materiais podem proporcionar, (ABRAF, 2013).

Em 2013, o consumo brasileiro de madeira de árvores plantadas para uso industrial, (Quadro 2) foi de 185,3 milhões de metros cúbicos (m<sup>3</sup>), o que representou aumento de 1,8% em relação ao consumo de 2012 (IBÁ, 2014).

Quadro 2 – Consumo brasileiro de madeira *in natura* para uso industrial por segmento e gênero, 2013.

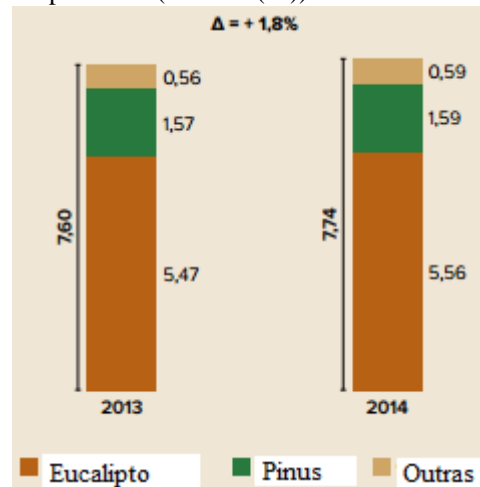
Segmento	Consumo de madeira <i>in natura</i> (m <sup>3</sup> )		
	Eucalipto	Outras	Total
Celulose e Papel	56,628,357	8,565,343	65,193,700
Painéis de Madeira	6,428,162	13,835,870	20,264,032
Serrados e outros Produtos Sólidos	6,870,498	15,652,551	22,523,049
Carvão	23,533,724	-	23,533,724
Lenha Industrial	41,832,528	8,191,600	50,024,128
Madeira Tratada	1,824,012	-	1,824,012
Cavacos de Madeira e outros	1,129,621	781,200	1,910,821
<b>Total</b>	<b>138,246,902</b>	<b>47,026,564</b>	<b>185,273,466</b>

Fonte: IBÁ, 2014.

A área de árvores plantadas para fins industriais no Brasil totalizou 7,74 milhões de hectares em 2014, aumento de 1,8% em relação a 2013. Esse total corresponde a apenas 0,9% do território brasileiro. Além das árvores plantadas, dos 851 milhões de hectares do território nacional, 66,1% estavam cobertos por habitats naturais, 23,3% ocupados por pastagens, 6,2% por

agricultura e 3,5% por redes de infraestrutura e áreas urbanas. Os plantios de eucalipto ocupam 5,56 milhões de hectares da área de árvores plantadas no País, o que representa 71,9% do total em Figura 6, e estão localizados principalmente nos estados de Minas Gerais (25,2%), São Paulo (17,6%) e Mato Grosso do Sul (14,5%), (IBÁ, 2014).

Figura 6 – Evolução de área de árvores plantadas (milhões (ha)).



Fonte: IBÁ 2015: ano base 2014.

A demanda por materiais renováveis tem se intensificado. As necessidades crescentes geradas pelo aumento da população e o padrão de consumo contribuem para o esgotamento dos recursos naturais do planeta, inclusive das florestas tropicais nativas. Estas não podem suprir a crescente demanda humana por madeira, mesmo se exploradas de forma racional. Assim o reflorestamento é parte importante na solução para a diminuição do desmatamento existente sobre todas as florestas nativas. No Brasil, as árvores de Pinus e Eucalipto são as mais utilizadas para esta finalidade (MANHÃES, 2008).

Segundo Valverde (2007) o cultivo do eucalipto em escala econômica no Brasil deu-se a partir de 1904. Com o reflorestamento, a área de plantio no Brasil em 2006 foi de aproximadamente três milhões de hectares de eucalipto.

Para Garcia, Mora (2000) e Leite et al. (2011) as espécies do gênero *Eucalyptus* são de grande versatilidade, com possibilidade de utilização em diversos segmentos, como óleos essenciais, celulose, madeira tratada, carvão vegetal e lenha, madeira serrada, painéis a base de madeira, entre outros.

### 2.1.7. Usinabilidade da madeira de eucalipto

Garcia e Mora (2000) comentam que as espécies de eucaliptos mais utilizadas no mundo são o *Eucalyptus grandis*, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. globulus*, *E. urophylla*, *E. viminalis*, *E. saligna* e *E. citriodora*.

Silva et al. (2006 a), afirmam que a dificuldade em usar a madeira de eucalipto na forma sólida se deve em grande parte no saber trabalhar com este material, declarando ser necessário conhecer a estrutura da madeira e parâmetros de usinagem que possibilitem bons resultados em termos de qualidade. Com relação ao processo de usinagem tem-se que cortes tangenciais sucessivos efetuados com serras de fita simples, não são indicados para a produção de madeira serrada, pois após a retirada de cada tábua, o bloco remanescente se deforma por flexão.

Os principais problemas que ocorrem com o eucalipto ao ser utilizado como madeira serrada é que durante a sua fase de crescimento a madeira acumula tensões que são liberadas no processo de desdobro, resultando na má qualidade das peças. Assim, é necessário o uso de técnicas adequadas para poder usar peças serradas desse material. De um modo geral, a madeira de eucalipto serrada é dimensionalmente instável o que leva a uma série de problemas de qualidade nos produtos finais, especialmente se a madeira for usada como elemento estrutural ou como componente de mobiliário, (VIDAURRE et al., 2007) e (TRUGILHO et al., 2011).

Quando se pretende priorizar a qualidade das tábuas, recomenda-se que o desdobro inicial seja realizado com serras de fita (simples ou dupla) até que o bloco atinja pequenas dimensões. Neste sistema de corte, os blocos devem ser girados após cada corte, assim, ao girar a tora as tensões tendem a ser liberadas de forma balanceada, resultando em um menor desperdício de material e produtos de melhor valor de mercado (VIDAURRE et al., 2007).

Lopes (2014) citou que em termos médios, para a madeira das três espécies de *Eucalyptus*, as menores velocidades de avanço promoveram os menores valores de  $R_a$ , indicando a melhor qualidade da superfície da madeira, com a rotação e o número de dentes da ferramenta mantidos constantes. Os estudos sobre a qualidade da superfície usinada, madeira de espécies de *Eucalyptus*, têm sido realizados no Brasil, por diversos autores (SILVA et al., 2005, 2007, 2009; SOUZA et al., 2009) indicando o potencial do gênero para a utilização da madeira para a produção de móveis, para uso sólido e de maior valor agregado. A otimização do processo de usinagem da madeira resulta em vantagens, como a diminuição do custo energético demandado

pelas máquinas operatrizes, maior aproveitamento da madeira, aumento da vida útil das ferramentas e da produtividade e redução dos custos de usinagem e do produto final.

Sobre as espécies de madeira utilizadas neste presente trabalho deve-se destacar que o *Eucalyptus citriodora* atualmente é designado por *Corymbia citriodora*. Na sequência estão descritos detalhes, características e utilização das madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna* (MARCHIORI e SOBRAL, 1997):

➤ *Corymbia citriodora* - A copa tem formato de guarda-chuva, a casca é fina, lisa, brilhante e de cor branca quando nova. As folhas jovens são alternas, pecioladas, ovais e com ponta fina, munidas de pêlos sobre as nervuras e na borda da lâmina, medindo de 7 a 15 centímetros de comprimento por 3 a 6 centímetros de largura. As folhas adultas são altamente pecioladas, de ponta fina, duras, medindo de 10 a 25 centímetros de comprimento por 1 a 4 centímetros de largura. As folhas, tanto jovens como adultas, quando esmagadas exalam um forte e distintivo cheiro, parecido com essência de limão. As inflorescências ocorrem em grupos integrados por 3 a 5 flores. Os frutos são de 10 mm peciolados, de forma ovóide ou ligeiramente cilíndrica. Esta espécie é originária da zona oeste de Queensland, Austrália. A qual se desenvolve melhor em regiões com latitude entre 17° a 26°S, de clima tropical a subtropical, resistindo até 0°C, precipitações anuais variando entre 600 a 1000 milímetros. Adapta-se em solos pobres com pedregulhos ou em solos vermelhos, profundos, argilosos e derivados de arenitos. A madeira é da cor castanho parda a cinza castanho escura. Considerada dura a muito dura e o seu peso específico encontra-se entre 0,9 a 1,1 g/cm<sup>3</sup>. Muito utilizada para cabos de ferramenta, extração de essências, postes e estruturas pesadas, em alguns casos de aplicação de marcenaria.

➤ *Eucalyptus saligna* - Ocorre naturalmente na Austrália, na região sul de Queensland, na região litorânea e nos vales das cadeias montanhosas próxima ao litoral de New South Wales. Tem sido plantada intensivamente no Brasil. Suas características gerais são: madeira de cor castanho-rosada, semi-dura (densidade 0,6 a 0,7 g/cm<sup>3</sup>). É considerada medianamente leve, de baixa estabilidade, de elevada permeabilidade e fácil de ser trabalhada em situações de usinagem. Suas utilidades: quando a madeira é oriunda de plantações de ciclo longo, é utilizada em construção e matéria-prima na fabricação de móveis enquanto que quando provem de plantações em ciclos curtos, é utilizada em caixotaria, paletes, celulose, papel, chapas duras, painéis aglomerados, carvão e mourões.

### 3. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA

Dentre as propriedades físicas da madeira, as mais importantes são a densidade, umidade da madeira e instabilidade dimensional (retratibilidade da madeira), são descritas a seguir.

#### 3.1. DENSIDADE

Por Gonçalves, 2000 a densidade juntamente com o teor de umidade são duas características de grande importância para classificar as madeiras serradas ou compostas. A densidade refere-se à massa de uma substância por unidade de volume e é expressa em termos de quilograma por metro cúbico. Matematicamente, a densidade é definida como Equação 1:

$$\rho = \frac{dm}{dv} \quad [\text{Kg/m}^3] \quad (1)$$

Para um corpo de seção finita em Equação 2, tem-se:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2)$$

Em Glass e Zelinka (2010) a densidade é o peso ou a massa de madeira dividida pelo volume da amostra a um teor de umidade determinado. Assim, a unidade de densidade normalmente é expressa no sistema internacional (SI) em quilogramas por metro cúbico ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) ou usual para madeira em grama por centímetro cúbico ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ). A densidade específica é definida como a razão da densidade de uma substância à densidade  $\rho_w$  da água a uma temperatura de referência especificado, tipicamente  $4^\circ\text{C}$ , onde  $\rho_w$  é  $1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  ( $1.000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Portanto, um material com uma densidade de  $5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  tem uma densidade específica de 5. Quando valores de densidade são relatados na literatura, o teor de umidade da madeira também deve ser especificado. A densidade básica da madeira ( $D_b$ ) varia significativamente entre as espécies.

As densidades básica e aparente podem ser calculadas pelas Equações 3 e 4, respectivamente.

$$D_b = \left( \frac{m_s}{m_v - m_{im}} \right) \cdot D_a \quad (3)$$

Onde:

$D_b$  = densidade básica,  $\text{g.cm}^{-3}$ ;  
 $m_s$  = massa de amostra seca, em g;  
 $m_v$  = massa de amostra saturada em água, em g;  
 $m_{im}$  = massa de amostra saturada imersa em água, em g;  
 $D_a$  = densidade da água a  $25^\circ\text{C}$ .

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

Onde:

$D_{ap(12\%)}$  = densidade da madeira a 12% de umidade,  $\text{g.cm}^{-3}$ ;  
 $m_{12\%}$  = massa de amostra a 12% de umidade, em g;  
 $V_{12\%}$  = volume da amostra a 12% de umidade, em  $\text{cm}^3$ .

### 3.1.2. Umidade da madeira

Koch (1964) comenta que, de modo geral as forças de corte para o corte ortogonal na direção 90-0, permanece aproximadamente constante na madeira seca até cerca de 8% de umidade, e então cai para aproximadamente 1/4 ou 1/2 desse valor quando a madeira se aproxima do ponto de saturação.

Vários autores argumentam sobre a influência do teor de umidade no processo de usinagem da madeira, como Kollman et al. (1984), Gonçalves (2000) e Aguilera et al. (2011), citaram o teor de umidade como uma das propriedades físicas de grande influência na usinabilidade da madeira. Estes mesmos autores explicam que, a força de corte diminui quando o teor de umidade é aumentado. Esse efeito, segundo eles, pode ser justificado pela absorção de água na parede celular, aumentando o espaço entre as células e diminuindo assim a resistência mecânica da madeira a teores de umidade elevados. Por outro lado, quando a teores de umidade muito baixos (madeira seca), ou seja, umidade abaixo do ponto de saturação das fibras, há uma redução dos espaços submicroscópicos entre as células formadoras da parede celular, aumentando a rigidez da mesma e com isso, aumentando a resistência mecânica de modo exponencial.

Para Gonçalves (2000) vários são os fatores que interferem sobre as forças e a potência de usinagem, nas diferentes operações de corte da madeira, afetando o desempenho de corte das ferramentas, como teor de umidade, densidade e direcionamento das fibras (referente à madeira)

e espessura de corte, velocidade de corte e geometria da ferramenta (referente ao processo). O esforço de corte é mais elevado quando se corta madeira seca e menor para madeira verde. A taxa de aumento do esforço de corte varia desde desprezível, para madeiras muito densas (acima de  $1000 \text{ kg.m}^{-3}$ ), a até 20% de acréscimo de esforço de corte entre o estado verde e seco, de uma espécie muito macia. O efeito da umidade nas características mecânicas da madeira pode ser genericamente expresso dizendo que a madeira seca é mais resistente do que a madeira úmida. Uma vez que se exceda o ponto de saturação das fibras, nenhuma mudança apreciável nas propriedades mecânicas da madeira a temperaturas normais pode ser observada.

Para Néri (2003) a umidade afeta as propriedades mecânicas da madeira, e, por conseguinte, as forças desenvolvidas no processo de usinagem.

Wiedenhoeft (2010) a parede celular é em grande parte composta de celulose e hemicelulose, e os grupos hidroxilas desses produtos químicos fazem da parede celular um material higroscópico. A lignina, o agente de cimentação das células, é uma molécula relativamente hidrofóbica, isto significa que as paredes celulares da madeira têm uma grande afinidade para a água, mas a capacidade das paredes para absorver a água é limitada, em parte, pela presença de lignina. Água na madeira tem um forte efeito sobre as propriedades da madeira, e as relações de água na madeira muito afetam o seu uso industrial.

Glass e Zelinka (2010) a relação entre o peso da água contida no seu interior e o seu peso no estado completamente seco, expresso em porcentagem, definem o teor de umidade da madeira (teor de umidade na base seca).

Aguilera et al. (2011) comenta que o estado da geometria e material da aresta de corte é parte resultante fundamental da qualidade, como também é a matéria-prima em termos de seu conteúdo de umidade e densidade. Segunda a Norma Brasileira Registrada (NBR) 07190 o teor de umidade na base seca é calculado pela Equação 5.

$$U_{(\%)} = \left( \frac{m_i - m_s}{m_s} \right) \cdot 100 \quad (5)$$

Onde:

$U_{(%)}$  = porcentagem de umidade;

$m_i$  = massa inicial da amostra, em kg;

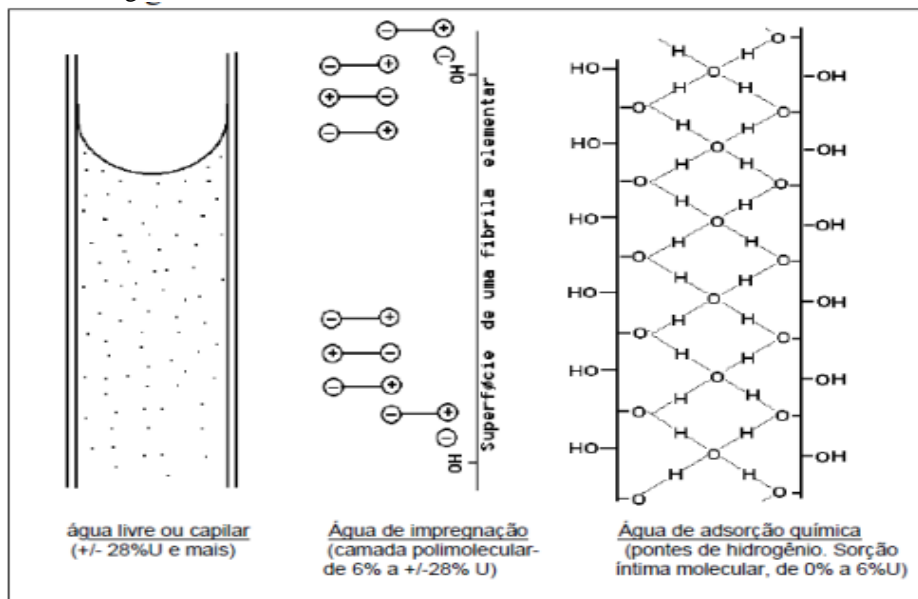
$m_s$  = massa da amostra seca, em kg.

Para Glass e Zelinka (2010) existe uma relação entre a massa específica da madeira de uma árvore recém-cortada e a água contida nos seus espaços celulares e intercelulares (água livre ou de capilaridade), da água impregnada nas paredes celulares (água de impregnação) e da água que participa da sua constituição química (água de adsorção química).

Klock (2012) comenta que a água presente na madeira pode ser dividida em três diferentes condições de extrema importância em termos de qualidade, sendo elas:

- Água livre ou de capilaridade: a que preenche seus espaços capilares, formados pelos lúmens e espaços intercelulares (acima do ponto de saturação das fibras, ou seja, acima de aproximadamente 28 % de umidade);
- Água de impregnação adsorvida: a impregnada nos espaços submicroscópicos da parede celular, ligadas por forças elétricas polares (entre 6 e 28 % de umidade) e
- Água de adsorção química: a aderida às interfaces existentes entre moléculas de celulose e de hemicelulose por forças de valências secundárias monomoleculares, forças de Van der Waals e ligações de hidrogênio (entre 0 e 6 % de umidade). A distribuição dos três diferentes tipos de água presentes na madeira é apresentada na Figura 7.

Figura 7- Formas de água existentes na madeira.



Fonte: Notas de aula, disciplina de química da madeira, PROF. Dr. Umberto Klock, UFPR, 2012.

### 3.1.3. Estabilidade dimensional da madeira

De acordo com Oliveira (1997), retratibilidade da madeira é o fenômeno decorrente da variação dimensional, em função da troca de umidade da madeira com o meio que o envolve. Ocorrendo somente abaixo do ponto de saturação de fibras, pois a umidade responsável pela retratibilidade esta localizada nas paredes celulares.

Severo (1998) em sua tese diz que sendo a madeira um material anisotrópico é mais importante ter conhecimento das variações lineares, das dimensões na diferentes direções, do que a variação volumétrica total da madeira.

Logsdon et al. (2008), Panshin e Brown<sup>1</sup> (1964) apud Junior 2011, citam sobre as alterações dimensionais da madeira, que são observadas nas três direções estruturais. Essas mudanças dimensionais incluem o inchamento, associado com adição de água e a retração, como resultado da remoção de água da madeira.

Gonçalves (2000) sobre a da madeira apresenta três seções ou planos de corte, da mesma forma a retratibilidade ocorre nos mesmos planos, são eles: axial, tangencial e radial. A retração axial é em termos percentuais a menor delas e ocorre segundo a direção das fibras da madeira. A retração radial se dá segundo na direção dos raios medulares da seção transversal do tronco da árvore. A retração tangencial é a maior e ocorre segundo a tangente aos anéis de crescimento no plano transversal ao eixo da árvore.

A ocorrência de um fator anisotrópico menor na região próxima a casca foi descrita por Oliveira (2003) estudando *Eucalyptus saligna*, relatou que a ocorrência de menor variabilidade entre as contrações tangencial e radial na região mais externa do fuste vai ocasionar esse menor fator de anisotropia que se reflete numa madeira de melhor qualidade.

Silva e Oliveira (2003) obtiveram baixos valores de retração da madeira de eucalipto na região próxima a medula, com maior contração longitudinal, pelo ângulo fibrilar mais aberto. Na região periférica os valores de retração da madeira foram mais altos nas orientações radial e tangencial.

Trugilho et al. (2002), determinaram para a madeira de *Eucalyptus spp* os valores de 9,8, 6,4, 0,3 e 16,3% para as contrações tangencial, radial, longitudinal volumétrica, respectivamente, com o coeficiente de anisotropia de 1,58.

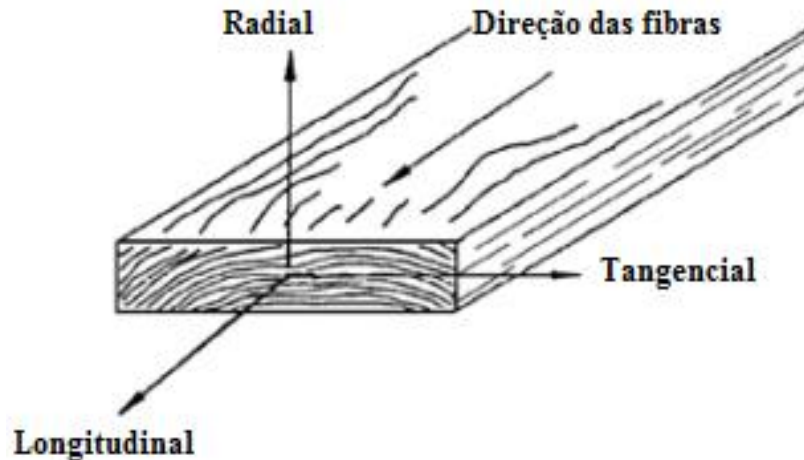
---

<sup>1</sup> PANSHIN, A. J.; BROWN, H. P. Textbook of wood technology. 2. ed. New York: McGrawHill, 1964. 643 p.

### 3.1.4. Propriedades mecânicas

Kretschmann (2010) afirma que a madeira pode ser descrita como um material ortotrópico; ou seja, ele tem propriedades mecânicas únicas e independentes nas direções dos três eixos perpendiculares: longitudinal, radial e tangencial. Estes eixos estão apresentados na Figura 8. O eixo longitudinal é paralelo da fibra (grã); o eixo radial é normal aos anéis de crescimento (perpendiculares à grã na direção radial); e o eixo tangencial é perpendicular à grã, mas tangente para os anéis de crescimento.

Figura 8 – Os três eixos principais da madeira com relação à direção da grã e anéis de crescimento.



Fonte: Adaptado de KRETSCHMANN, D. E. Mechanical Properties of Wood. In: Forest Products Laboratory. **Wood Handbook: wood as an engineering material**. Centennial Edition. Madison: FPL, 2010.

A ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas - é o Fórum Nacional de Normalização. As Normas Brasileiras, cujo conteúdo é de responsabilidade dos Comitês Brasileiros (CB) e dos Organismos de Normalização Setorial (ONS), são elaboradas por Comissões de Estudo (CE), formadas por representantes dos setores envolvidos, delas fazendo parte: produtores, consumidores e neutros (universidades, laboratórios e outros). Os ensaios para determinação de propriedades mecânicas das madeiras para projeto de estruturas, tendo em vista a caracterização das madeiras, servem exclusivamente como elementos comparativos das resistências entre diferentes espécies, quais sejam: a) umidade; b) densidade; c) estabilidade dimensional; d) compressão paralela às fibras; e) tração paralela às fibras; f) compressão normal às fibras; g) tração normal às fibras; h) cisalhamento; i) fendilhamento; j) flexão; k) dureza; l)

resistência ao impacto na flexão; m) embutimento; n) cisalhamento na lâmina de cola; o) tração normal à lâmina de cola; p) resistência das emendas dentadas e biseladas. A umidade, densidade e estabilidade dimensional já foram apresentadas com relação às suas propriedades físicas. A NBR 7190 apresentam alguns dos principais ensaios mecânicos que devem ser realizados na madeira a fim de sua caracterização mecânica. Propriedades mecânicas mais comumente medidas representam as "Propriedades de resistência" para projeto, incluem o módulo de ruptura na flexão, tensão máxima de compressão paralela à grã, tensão de compressão perpendicular à grã e cisalhamento paralelo a grã. Medições adicionais são feitas frequentemente para avaliar o trabalho de carga máxima em flexão, impacto, flexão, força, dureza e resistência à tração perpendicular a grã.

O IPT (2009) cita os resultados obtidos para as propriedades físicas e mecânicas da espécie *Eucalyptus sp* de acordo com a norma ABNT mb26/53 (NBR 6230/85), a seguir:

- Densidade de massa ( $\rho$ ): Aparente a 15% de umidade: 500 kg/m<sup>3</sup>; Básica: 420 kg/m<sup>3</sup>; Contração: radial: 5,3%; tangencial: 8,7%; volumétrica: 15,7%.
  
- Flexão - resistência ( $f_M$ ): Madeira verde (MPa): 53,8; Madeira a 15% de umidade (MPa): 75,6; Módulo de elasticidade - madeira verde (MPa): 9 689.

Ademais, existem os ensaios mecânicos não destrutivos, que a amostra não é danificada, área que está em constante pesquisa e desenvolvimento.

## 3.2. FUNDAMENTOS DA USINAGEM DA MADEIRA

### 3.2.1. Sistemas de Corte

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

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

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

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

Os diferentes sistemas de corte da madeira são definidos por uma notação sugerida por Mckenzie<sup>2</sup> (1960) apud Koch, 1964; onde o primeiro número da notação representa o ângulo da aresta de corte em relação à direção das fibras e, o segundo número fornece o ângulo da direção do movimento em relação à direção das fibras, como descrito a seguir:

Corte 90-0: A aresta de corte faz um ângulo de 90° com a direção das fibras e a direção de movimento a 0° com a direção das fibras.

Corte 0-90: A aresta de corte está paralela à direção das fibras e a direção do movimento é perpendicular às fibras.

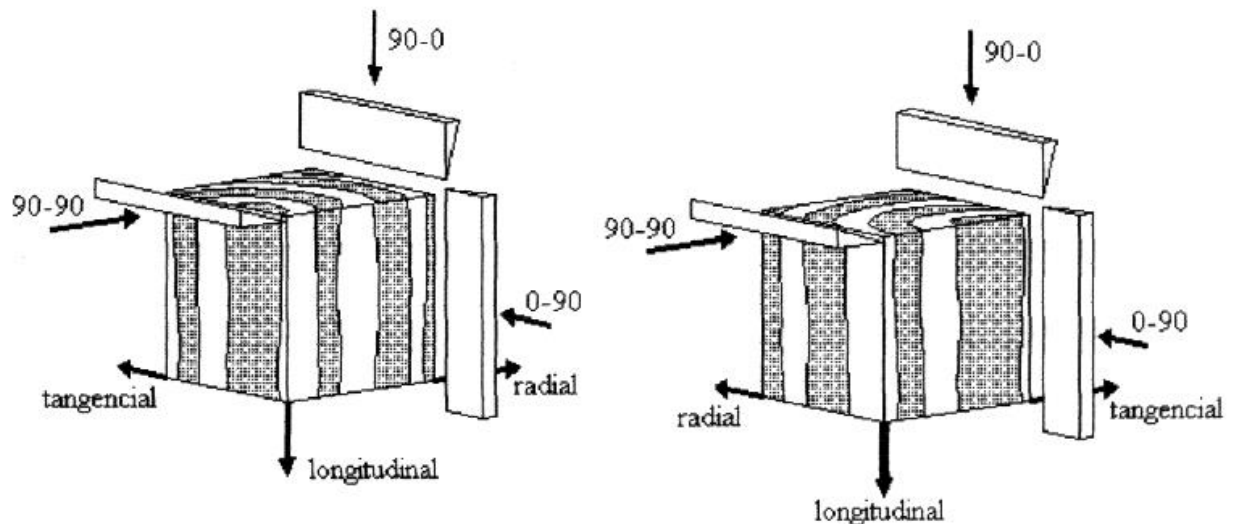
Corte 90-90: Tanto a aresta de corte como a direção do movimento, são perpendiculares à direção das fibras.

Este sistema de corte aplica-se nas operações do processo de serramento de desdobro, ilustrado em Figura 9.

---

<sup>2</sup>MCKENZIE, W.M. Fundamental aspects of the Wood cutting process. **Forest Products Journal** v.12, n.6, p19-26, 1960 apud . KOCH, P. **Wood Machining Processes**. New York: Ronald Press Company, 1964.530p.

Figura 9 - Sistemas de corte com relação à seção transversal da madeira.



Fonte: KOCH, 1964, apud GONÇALVES, 2000, p.21.

McKenzie<sup>3</sup> (1964) apud Gonçalves (2000) propôs, também, uma notação com dois números para descrever situações diferentes de corte que podem ocorrer durante o corte ortogonal da madeira. O primeiro representa o ângulo entre a aresta da ferramenta e a fibra da madeira. O segundo indica o ângulo entre a direção de corte e a fibra da madeira. Esta notação define as três principais direções de corte (Figura 11), chamados 90-0, 90-90, e 0-90. A situação 90-0 (direção longitudinal ou axial) é encontrada em ações de corte como no processo de fresamento, em aplainamento ou desengrosso e trabalhos de corte de molduras na direção paralela às fibras. O corte perpendicular às fibras requer maior energia para ser efetuado que o corte ao longo das fibras, e, portanto no corte perpendicular às fibras, a força de corte tende a ser maior que no corte paralelo às fibras.

### 3.2.2. O Processo de Usinagem

A usinagem é uma operação que visa à geração de dimensão, forma e acabamento, ou a combinação dessas características em uma peça produzindo cavaco. Entendendo-se cavaco como uma porção de material de uma peça que é retirada através de uma ferramenta de forma geométrica. (FERRARESI, 1977).

<sup>3</sup>McKENZIE, W.M. Fundamental aspects of the wood cutting process. Forest Products Journal, v.10, n.9, p.447-456. 1964.

No final do século XIX, já com a energia elétrica no lugar do vapor, deu-se início aos estudos, com Frederick Winslow Taylor, dos fenômenos que ocorrem nos processos de usinagem, que visavam o aumento da produtividade na fabricação. As pesquisas de Taylor revolucionaram os processos produtivos através do desenvolvimento do aço rápido, dos fluidos de corte e da determinação da equação de vida para ferramentas de corte. Já no século XX, o objetivo principal das empresas era a busca por novos processos de usinagem para aumentar a produção e a qualidade, e diminuir custo dos produtos, devido ao desenvolvimento tecnológico acelerado e a competitividade (MACHADO, 2008).

Em 1797, Henry Maudslay desenvolveu o primeiro torno com avanço automático, permitindo a produção de roscas com passo definido. Em 1862 surge a primeira fresadora universal, desenvolvida por J. R. Brown, que foi utilizada inicialmente para a produção de canais em brocas helicoidais (SANTOS e SALES, 2007).

Até meados do século XVIII, o principal material utilizado para se fabricar peças na indústria metal mecânica, era a madeira, que era usinada com ferramentas de aço carbono.

O processo de usinagem envolve os processos de fresamento, torneamento, furação, rosqueamento, entre outros. O segmento de usinagem é uma área de pesquisa muito abrangente e de caráter interdisciplinar. A mecânica do corte é uma área de estudo bastante complexa, cujo campo de pesquisa é vasto. Diversos modelos de corte com diferentes abordagens têm sido aplicados para melhor compreensão da usinagem. Neste sentido é necessário conhecer as forças de usinagem envolvidas para ser capaz de prever o comportamento dinâmico, o acabamento da superfície, o desgaste excessivo e a quebra da ferramenta (CARDOSO, 2012).

Pinheiro (2014) comenta que existem três variáveis importantes na usinagem que influenciam os resultados: o material a ser usinado, a ferramenta de corte e a remoção de cavacos. A combinação mais adequada entre essas variáveis reflete em usinagens mais precisas.

### **3.2.3. Fresamento**

O fresamento é um método de usinagem muito utilizado na indústria moveleira em operações envolvendo máquinas como plainas, tupias e desgrossadeiras. O fresamento é um processo mecânico de usinagem para obtenção de superfícies através de movimento rotativo de ferramentas multicortantes. A ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam em uma

trajetória específica, a obtenção de uma superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta (Fresamento Frontal), (FERRARESI, 1977), Figura 11.

Os movimentos no processo de fresamento tangencial ou periférico são movimentos relativos entre a aresta de corte e a peça, conforme ilustrado na Figura 10.

Os movimentos e grandezas de avanço são referidos à peça parada, e normalmente representados com uso de outros parâmetros, tais como:

$P_{fe}$  = Plano de trabalho é o plano que passando pelo ponto de corte escolhido contém as direções de corte e de avanço;

$V_c$  = Velocidade de corte em m/s;

$V_e$  = Velocidade efetiva em m/s;

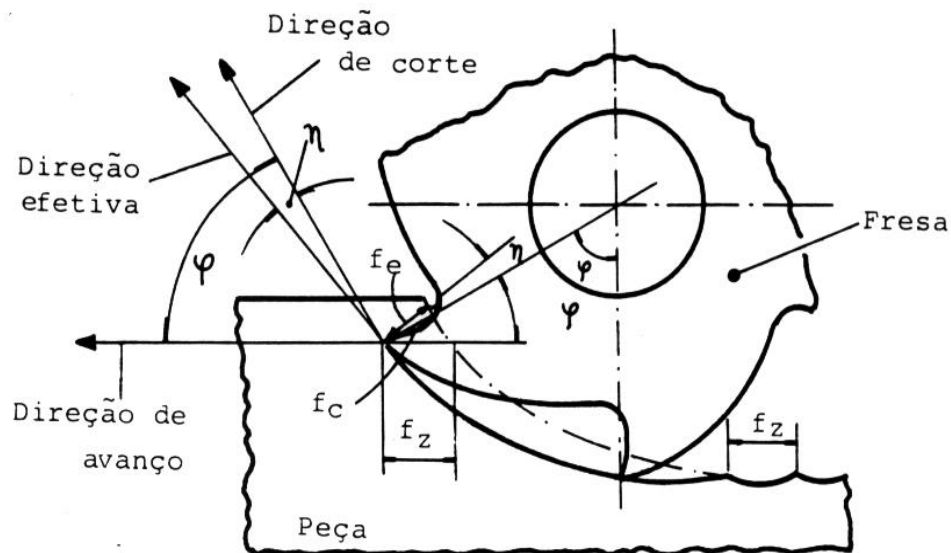
$V_f$  = Velocidade de avanço em m/min;

$a_e$  = Profundidade de corte em mm;

$\eta$  = Ângulo de direção efetiva e

$\varphi$  = Ângulo de direção de avanço.

Figura 10 – Avanço por dente ( $f_z$ ), avanço de corte ( $f_c$ ) e avanço efetivo ( $f_e$ ) no fresamento discordante.



Fonte: Gonçalves, 2000.

Das relações geométricas, temos Equação 6:

$$V_f = f_z \cdot Z \cdot n \quad (6)$$

Onde o avanço da peça, dada que Equação 7:

$$f_z \cdot Z = f \quad (7)$$

logo, a velocidade de avanço fica, pela Equação 8:

$$V_f = f \cdot n \quad (8)$$

Sendo:

$f_z$  = Avanço por dente da ferramenta em mm/rotação;

$Z$  = Número de dentes da ferramenta;

$n$  = Rotação da ferramenta por minuto [rotação/minuto];

$f$  = Avanço da peça em mm/minuto.

Fresamento básicos segundo a trajetória da ferramenta, o fresamento tangencial e o fresamento frontal.

Rigatti (2010) descreve o fresamento como a remoção de cavaco que provoca uma forma na peça com dimensões e acabamento específico.

As principais características da usinagem por fresamento são a fresa que é constituída de arestas simétricas dispostas em torno de um eixo, a rotação da fresa ao redor do seu eixo que proporciona movimento de corte, a peça em usinagem que está fixa na mesa e proporciona o movimento de avanço, pois passa sob a ferramenta em rotação gerando a forma e as dimensões (DINIZ et al., 2013).

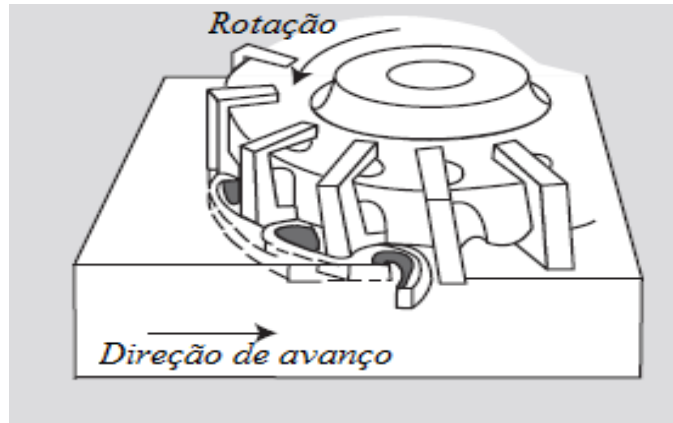
Trabalhos recentes vêm investigando os parâmetros utilizados em fresamento de madeira, como Lopes (2014) que aplicou o fresamento, teve por objetivo analisar a rugosidade superficial da madeira de *Eucalyptus grandis*, *E. dunniie* e *E. urophylla* fresadas perifericamente em 7 velocidades de avanço nominais (3, 4, 6, 8, 11, 15 e 22 m.min-1).

### 3.2.4. Fresamento frontal

O fresamento frontal é caracterizado pela obtenção da superfície plana da peça usinada perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta (MAIA, 2009).

Os dentes ativos da fresa se encontram na superfície frontal na ferramenta, é considerado fresamento frontal (DINIZ et al., 2013), como mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Fresamento frontal.



Fonte: Adaptado de Machado et al., 2009.

No fresamento frontal, a superfície usinada é gerada pela aresta principal e encontra-se normalmente perpendicular ao eixo da fresa. Também é plana, sem relação com o contorno dos dentes da fresa. A penetração de trabalho ( $a_e$ ) é consideravelmente maior que a profundidade de corte ( $a_p$ ). Nesta operação, ocorrem simultaneamente fresamento concordante e discordante.

### 3.2.5. Fresamento cilíndrico tangencial ou periférico

Para Ferraresi (1977) é considerado fresamento tangencial se o eixo de rotação da ferramenta estiver inclinado em relação à superfície originada na peça.

Segundo Gonçalves (2000) no fresamento periférico esta situação de usinagem, pode também ser chamada de aplainamento para processos de usinagem da madeira, envolve a remoção de excesso de madeira da peça em usinagem na forma de cavacos, os quais são formados pelo contato intermitente da peça com a ferramenta de uma ou mais facas que giram no porta-ferramentas.

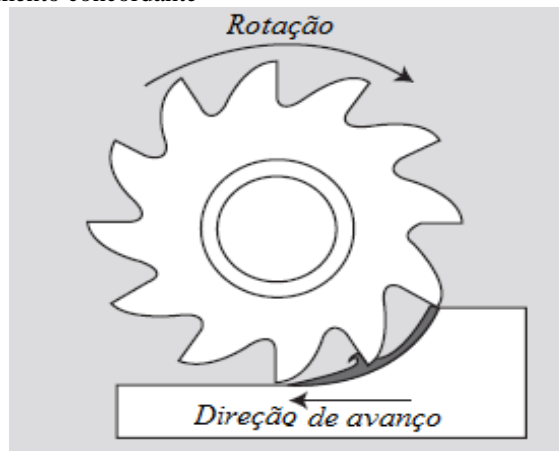
Assim como para Diniz et al. (2013) que o definem quando o eixo da fresa for paralelo à superfície gerada e os dentes ativos se encontrarem na superfície cilíndrica da ferramenta. No fresamento tangencial, a posição da ferramenta e a direção de avanço sobre a peça usinada se relacionam, definindo assim se o fresamento é concordante ou discordante. As técnicas de corte discordante e concordante são comumente designadas por *up-milling* e *dow-milling* respectivamente.

### 3.2.6. Fresamento concordante

O fresamento concordante se caracteriza pelo movimento de avanço e o movimento rotatório da fresa estarem no mesmo sentido. Neste corte o ângulo  $\phi$  começa em um valor máximo e decresce até zero. A componente vertical da força de usinagem tem sempre o mesmo sentido, sempre empurrando a peça na direção da mesa. Como a aresta de corte penetra na peça em um ângulo máximo, o contato inicial se dá em condições desfavoráveis, diminuindo a vida da ferramenta. (DINIZ et al., 2001).

Apresentam-se a seguir os movimentos e relações geométricas para o fresamento cilíndrico tangencial concordante (*down milling*) como mostrado em Figura 12.

Figura 12 - Geometria do fresamento concordante



Fonte: Adaptado de Machado et al., 2009.

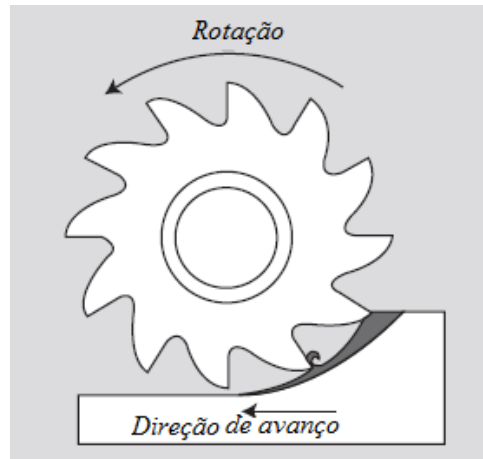
### 3.2.7. Fresamento discordante

No fresamento discordante (*up-milling*) o sentido de movimento de avanço é contrário ao sentido do movimento rotatório da fresa, e o ângulo de direção de avanço ( $\phi$ ), ângulo entre a linha radial da fresa em que se tem o contato da aresta com a peça e outra linha radial que passa pelo ponto onde a espessura do cavaco é inicialmente zero e atinge um valor máximo no final da passagem da aresta de corte. Quando a aresta toca a peça, ela é forçada para dentro da peça, criando um grande atrito que acarreta em uma deformação plástica ao invés da formação de cavaco naquela região e ainda altas temperaturas. Com o corte em superfícies encruadas pelo dente anterior, o atrito favorece o aumento do desgaste da ferramenta. Quando se trata da ação

discordante, ocorre o contrário. Os sentidos das velocidades de corte e de avanço são, em média, opostos. A espessura do cavaco cresce durante a sua formação. Neste caso, a espessura do cavaco é mínima no início do corte e máxima no final. (DINIZ et al., 2001).

Apresentam-se a seguir os movimentos e relações geométricas para o fresamento cilíndrico tangencial discordante ver Figura 13.

Figura 13 - Fresamento discordante.



Fonte: Adaptado de Machado et al., 2009.

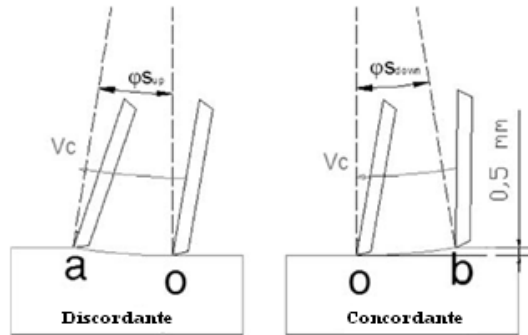
### 3.2.8. Estudos do fresamento concordante e discordante no material madeira

Goli et al. 2009, em pesquisa sobre estas técnicas de fresamento, verificaram que usando da técnica discordante, embora o cavaco seja mais longo, resultando em menos uso da ferramenta; isto, devido a última parte do cavaco que normalmente é rasgado em vez de ser cortado, e por causa do começo ser progressivo em lugar do corte abrupto. Estas diferenças entre as duas técnicas são principalmente designado às geometrias cortantes diferentes.

Quando discordante, o corte começa à parte mais fina do cavaco (ponto O em Figura 14), enquanto o concordante começa à parte mais grossa (ponto b em Figura 14).

Além disso, há mudanças na orientação relativa da lâmina, em relação à grã, para o corte discordante e concordante.

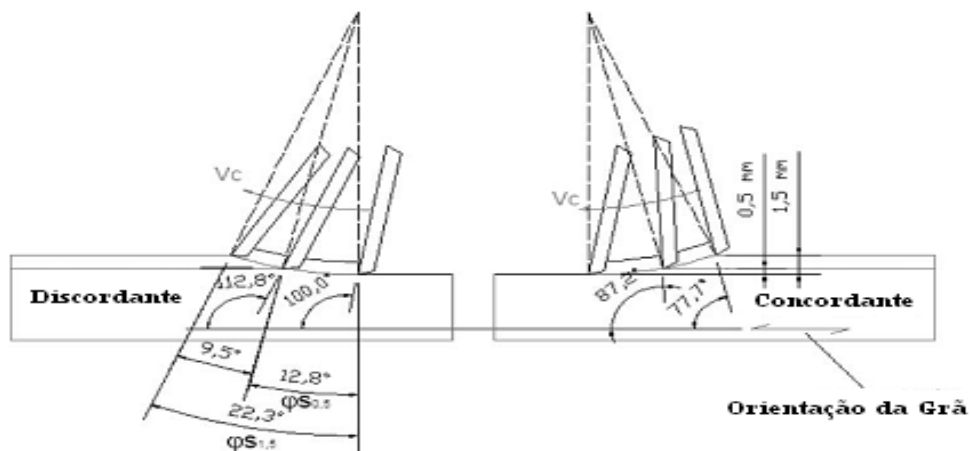
Figura 14 - Ponto de impacto diferente saindo da ferramenta quando discordante ou concordante. Ângulo de trabalho  $\varphi_{Sup}$  para a técnica discordante e  $\varphi_{Sdown}$  para a técnica concordante.



Fonte: Adaptado de GOLI et al., 2009.

Na realidade no corte discordante a ferramenta de corte caminha ao longo do arco Oa enquanto que no concordante está ao longo de bO do arco (ver Figura 14). No discordante as densidades de cavaco máximas são obtidas mesmo perto do ponto a, considerando que está perto do ponto b quando concordante. Dado que a rotação da ferramenta durante o corte é o trabalho do ângulo ( $\varphi_s$ ) pode ser dito que: durante um corte, discordante ou concordante, entre a mínima densidade de cavaco e a densidade máxima de cavaco a ferramenta tem uma rotação de  $\varphi_s$ , indicado na Figura 15, (GOLI et al., 2009).

Figura 15- Ângulos relativos entre a inclinação da face e grã no nível máximo de espessura do cavaco quando discordante ou concordante com 0,5 mm e 1,5 mm de  $a_p$  de 40 mm.



Fonte: Adaptado de GOLI et al., 2009

Goli et al. 2009 relatam que o movimento da ferramenta quando do corte discordante “UM”, sai da superfície e arranca as fibras, e em concordante “DM” vai para a superfície, pressionando as fibras, parece ser uma influência mais significativa sobre a superfície final,

quando “UM” que “DM”. O resultado destas condições é que em vez de conduzir às mudanças relevantes no status de superfície, corte discordante ou corte concordante traz mudanças relevantes nas forças de corte e tipos de cavacos em particular, sendo o seguinte:

- A qualidade final será estritamente dependente da orientação absoluta da grã ( $\Phi_a$ ) que determina a orientação da grã perto da superfície formada;
- Os tipos de cavacos e as forças de corte dependerão principalmente sobre a orientação relativa da grã ( $\Phi_r$ ) porque isso vai ser em nível da orientação da grã na espessura do cavaco.

Gonçalves (2000) comenta que se utilizam ferramentas de corpo único (fresas) mono ou multicortantes, com pastilhas ou lâminas de corte fixas no corpo da fresa ou intercambiáveis. O processo de serramento circular também se enquadra na situação de usinagem de fresamento, porém o corte não se limita somente como periférico paralelo às fibras. No fresamento convencional ou discordante, as ferramentas movem-se contrariamente ao movimento da peça; enquanto que no fresamento concordante a ferramenta e a peça se movimentam na mesma direção. Esta classificação vale somente no fresamento cilíndrico tangencial, de grande utilização no beneficiamento de madeiras.

### **3.2.9. Movimentos entre a peça de trabalho e a aresta cortante**

O fresamento ocorre entre diferentes movimentos que podem causar a saída direta de cavaco e movimentos que não participam da formação de cavaco, segundo. A velocidade instantânea do ponto da aresta cortante, segundo a direção efetiva do corte é denominada velocidade efetiva, sendo essa velocidade é resultante da velocidade de corte e de avanço (FERRARESI, 1977).

Ferraresi (1977) e Diniz et al.(2013) citam que o ângulo entre a direção de avanço e a direção de corte é denominado ângulo  $\phi$  da direção de avanço. O ângulo entre a direção efetiva de corte e a direção de corte é denominado ângulo  $\eta$  da direção efetiva de corte. O ângulo entre a superfície de folga e o plano de corte medido no plano de medida da cunha cortante é denominado ângulo de força  $\alpha$ . O ângulo entre a superfície de saída medida no plano de medida da cunha cortante é denominado ângulo da cunha  $\beta$ .

Eyma et al. (2004) citam que ocorre influência das forças de corte e da intensidade da força de corte necessária para o fresamento da madeira.

Os movimentos entre a peça, a aresta cortante e a peça estacionária são relativas no fresamento. Para o estudo da usinagem deve se definir as grandezas relacionadas, tais como: velocidade do corte, direção do corte, velocidade de avanço, direção de avanço e profundidade de usinagem entre outros (MACHADO, 2009).

Compreender as forças de usinagem é fundamental para determinação das condições de corte, vida útil da máquina e ferramenta e qualidade da peça (RIGATTI, 2010).

O movimento de avanço também ocorre entre a peça e a ferramenta que origina um levantamento contínuo de cavaco durante vários cursos, em conjunto com o movimento de corte (DINIZ et al., 2013).

Cardoso (2012) também cita a importância da usinagem, pois determina a qualidade da peça e o desgaste da ferramenta.

Kiswanto et al. (2014) diz que a superfície de alta qualidade pode ser obtida através da seleção adequada dos parâmetros de corte. Os parâmetros de corte são grandezas numéricas relacionadas ao deslocamento da ferramenta e da peça durante o fresamento, tais movimentos devem ser adequados a cada material tanto da ferramenta como da peça.

### **3.2.10. Velocidade de corte ( $V_c$ ), de avanço ( $V_f$ ) e profundidade de usinagem ( $a_p$ )**

Ferraresi (1977) e Machado et al. (2009) comentam que a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção e sentido de corte é denominada velocidade de corte. Nos processos com movimentos de rotação, a velocidade de corte ( $V_c$ ) é calculada através da Equação 9:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ (m/min)} \quad (9)$$

Onde: D = diâmetro da peça em mm e

n = números de rotações por minuto (rpm), com unidade de metros por minuto.

Wrublack et al. (2008) em sua pesquisa confirmou que a velocidade de corte influencia a vida da ferramenta, a eficiência do corte e o acabamento. Está diretamente ligada a potência e não influencia a pressão específica do corte.

A velocidade instantânea da ferramenta segundo a direção e sentido de avanço é denominada velocidade de avanço. Este é o movimento adicional proporcionado entre a peça e a



### 3.3. QUALIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA

#### 3.3.1. Acabamento superficial

Um estudo para avaliar o efeito de diferentes técnicas de usinagem sobre a rugosidade da superfície de madeira serrada foi desenvolvido por Hiziroglu (1996), Kilic et al. (2005) e Burdurlu et al. (2005), para as espécies *beech* (*Fagus orientalis*) e *aspen* (*Populus tremula*). A rugosidade da superfície das amostras foi medida empregando rugosímetro tipo apalpador, para 4 tipos de superfícies, sendo somente serrada, somente aplainada e lixada para granulometrias de 60 e 80, de ambas as espécies. Neste trabalho foram utilizados os seguintes parâmetros para determinar as características das superfícies das amostras:  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_k$ ,  $R_{pk}$  e  $R_{vk}$ . Com base nos resultados da análise estatística, medições realizadas a partir da superfície nas direções tangencial e radial de ambas as espécies, não apresentaram diferença significativa numa mesma condição de usinagem, num nível de confiança de 95%. No entanto, houve diferença estatística significativa de rugosidade entre as duas espécies experimentadas, quando comparadas às quatro maneiras diferentes de usinagem, para ambas as orientações das fibras.

Em trabalho de Hendarto et al. (2006), comentam que devido à falta de homogeneidade do material da madeira, o perfil da rugosidade de uma superfície é afetado pela estrutura anatômica da madeira, implicando diretamente na análise da qualidade da superfície da mesma.

Tibúrcio et al. (2006) analisou o acabamento superficial obtido na usinagem de madeiras das espécies *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus citriodora*, em operações de torneamento cilíndrico e lixamento. O desempenho de usinagem foi verificado através do acabamento superficial, e de medições da rugosidade e ondulações geradas nas superfícies das amostras usinadas nas duas operações descritas para cada condição de ensaio com parâmetros pré-estabelecidos. Os processos de usinagem empregados são descritos como: torneamento cilíndrico em cabeçote com 4 ferramentas para usinagem na direção perpendicular às fibras “0-90” (máquina para ensaio denominada “torno tubular”); lixamento em lixadeira dupla de cinta. Quanto à influência sobre o desempenho e acabamento superficial, os seguintes parâmetros foram variados: rotação, velocidade de alimentação, geometria das ferramentas de corte, granulometria das lixas, teor de umidade das amostras e densidade em função da espécie de madeira. As ferramentas de corte foram confeccionadas em aço rápido e em metal duro.

Lopes (2007) em sua pesquisa de mestrado teve por objetivo analisar os aspectos estéticos, físicos, mecânicos e de qualidade da superfície usinada da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus dunnii* aos 18 anos, objetivando sua aplicação na indústria moveleira. Foram coletadas três árvores de cada espécie da Estação Experimental de Ciências Florestais (EECF) da ESALQ/USP, localizada em Anhembi/SP. Os ensaios de massa específica aparente, densidade básica, variação dimensional e módulos de ruptura e elasticidade foram realizados de acordo com a NBR 7190/97. Para análise de qualidade da superfície usinada foram avaliados 48 corpos de prova de cada espécie, aplainados com 7 diferentes velocidades de avanço, e 3 leituras em cada corpo-de-prova, em diferentes posições, com rugosímetro. Foram realizadas análise de variância e testes de médias para cada parâmetro avaliado. Determinou a qualidade da superfície usinada das madeiras de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus urophylla* extraídas com 18 anos de idade. A usinagem foi realizada em fresadora de eixo vertical com cabeçote de fresa com faca de aço rápido, com o auxílio de controlador de avanço empregou-se 7 diferentes velocidades de avanço: 3, 4, 6, 8, 11, 15 e 22 m/min. As superfícies das amostras foram usinadas na direção paralela às fibras (90-0). Para medição da rugosidade foi empregado um rugosímetro Taylor Robson modelo Surtronic 3+, adotando-se o parâmetro de leitura de rugosidade  $R_a$ . O *E. urophylla* apresentou os melhores resultados, ou menores valores de  $R_a$  para a maioria das velocidades: 3, 6, 8, 15 e 22 m/min, o *E. dunnii* apresentou os piores para as velocidades 3,4,6 e 8m/min, e o *E. grandis* apresentou comportamento mediano, sendo que para 3,8 e 11m/min não houve diferença significativa entre as médias.

Tibúrcio (2009) foi realizada uma investigação na qualidade superficial de madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus citriodora* através da análise da rugosidade superficial em torno tubular com três velocidades de avanço e quatro jogos de lixa. Concluiu-se que para os conjuntos de lixas novas experimentadas, para desbaste e acabamento, respectivamente, apresentou o melhor desempenho quanto ao acabamento superficial obtido nas amostras. A cada aumento na velocidade de avanço de torneamento (0,4 mm no avanço por dente  $f_z$ ) das amostras, aumenta-se o valor da rugosidade média “ $R_a$ ” em 4%; destaca ainda, que a qualidade superficial é diretamente relacionada aos custos de pós-processamento e aparência estética do produto. Um dos parâmetros dessa influência é o processo de usinagem.

Gurau (2010) apresentou uma revisão de um método desenvolvido para superfícies de madeira com acabamento que abrange a escolha do tipo de instrumento, a resolução de medição, o comprimento mínimo de avaliação, aspectos da filtragem e separação entre o processo de cálculo da rugosidade e irregularidades anatômicas. A rugosidade representa as finas irregularidades da superfície causadas pelo processo de usinagem. No entanto, o perfil analisado não é feito somente pelos dados da rugosidade, mas também por "erros" de forma (anatomia) e ondulações que não fazem parte do processo, esses itens podem ser excluídos da rugosidade.

Camilo 2013 usinou o *Eucalyptus grandis* e obteve as seguintes conclusões, que se pode observar que para a velocidade de corte constante de 10,9 m/s o melhor acabamento foi alcançado com a velocidade de avanço de 7 m/min no fresamento concordante para medida de  $R_a$  realizada a favor. Já para a velocidade de avanço constante de 5 m/min o melhor acabamento foi alcançado com a velocidade de corte de 8,4 m/s no fresamento discordante para medida de  $R_a$  realizada a favor. Pode-se observar que tanto a variação da velocidade de corte como a variação da velocidade de avanço influenciou na rugosidade.

Deus (2014) conclui em sua pesquisa que o parâmetro que mais influenciou a qualidade superficial foi a velocidade de corte. Evidenciando em todos os ensaios que as velocidades de corte de 603 e 804 m/min, ou seja, as maiores velocidades de corte utilizadas, correspondem aos menores valores de rugosidade. Este comportamento também pode ser observado na análise de superfícies do MEV. Os valores de velocidade de avanço e a profundidade de usinagem que apresentam influencia na qualidade superficial nos ensaios realizados neste trabalho foram: velocidade de avanço de 4 m/min e profundidade de 1,5 mm para o fresamento tangencial e velocidade de avanço de 4 m/min e profundidade de 3 mm para o fresamento frontal. No fresamento tangencial o sentido de corte que apresentam influência nestes ensaios foi o sentido discordante, que corresponde aos menores valores de rugosidade. O fresamento frontal apresenta os menores valores de rugosidade em relação a todos os fresamentos realizados, principalmente na profundidade de 3 mm. O consumo da potência para as velocidades de corte de 603 e 804 m/min apresentaram resultados 54% menores. Já para a velocidade de avanço e a profundidade de usinagem não houve influência significativa.

### 3.3.2. Medição da rugosidade

De acordo com Silva et al. (2006a) os desvios que podem ocorrer ao longo de uma superfície são classificados como de 1º, 2º, 3º e 4º ordens. O desvio de 1º ordem está relacionado à forma da superfície da madeira (planicidade, cilíndricidade e retinicidade). O desvio de 2º ordem está relacionado às ondulações da superfície usinada da madeira. E os desvios de 3º e 4º ordens estão relacionados à rugosidade da superfície usinada da madeira e são originados do processo de formação do cavaco, forma da ferramenta e avanço ou profundidade de corte. Dessa forma a análise de rugosidade torna-se necessária para qualificar de maneira precisa a superfície usinada da madeira.

Lemaster (2004) em pesquisa sobre a rugosidade e sua topografia que são propriedades dos materiais de engenharia importantes para o desempenho funcional, medir quantitativamente a qualidade do produto pode ser usado como uma medida de desempenho do processo. Textura da superfície pode ser causada pela natureza do material em si, um processo de fabricação aplicada ao material, ou uma combinação de ambos. As características de processamento que afetam a textura da superfície incluem: imprecisão na máquina-ferramenta, deformação sob força de corte, ferramenta ou peça, a vibração, da geometria da ação de cortedurante a formação de cavacos e efeitos do tratamento térmico. Características da madeira que podem afetar a textura da superfície incluem: espécies de madeira, densidade, teor de umidade, e direção de corte.

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

Silva et al. (2006b) avaliaram a técnica de captura de imagens de superfícies usinadas de madeiras de Eucalipto por meio de iluminação com laser de baixa potência aplicada em diferentes ângulos (metrologia óptica Laser Ne-He). As imagens foram processadas tomando como base os padrões de manchas formados na superfície do material, usando as sombras formadas pela iluminação da madeira. Os resultados mostraram que a iluminação

aproximadamente paralela entre a madeira e o laser foi a que apresentou imagens mais bem definidas, possibilitando a visualização dos picos gerados pelos avanços por dente ( $f_z$ ). A potencialidade da técnica ficou comprovada como viável, necessitando seu aprimoramento, bem como tratamento das imagens para sua mensuração.

No mesmo ano, os autores Silva et al. (2006b), realizaram novos experimentos, com o objetivo de medir a textura da superfície usinada da madeira de Eucalipto empregando o rugosímetro Surtronic 3+ e de determinar o avanço por dente calculado e medido por inspeção direta da superfície, correlacionando os parâmetros de rugosidade com os valores de avanço por dente “ $f_z$ ”. Os ensaios de usinagem foram desenvolvidos em uma tupa moldureira com velocidades de avanço de 3,6; 15,0 e 30,0 m/min, diâmetros das fresas de 80, 100 e 125 mm e diferentes ângulos de afiação. Os resultados de avanço por dente mostraram que com menor velocidade de avanço e maior rotação apresentaram melhores resultados quanto à qualidade da superfície, independentemente dos ângulos da ferramenta. Dependendo do ângulo do dente da ferramenta usado, foi observada variação da rugosidade para parâmetros de usinagem semelhantes.

Silva et al. (2006b), nos estudos verificaram para o Surtronic 3+, os parâmetros de rugosidade fornecidos:

➤  $R_a$  - é um parâmetro que se baseia na medição da textura de uma superfície por meio do recurso da linha. Sua rugosidade é determinada por meio da Equação 11.

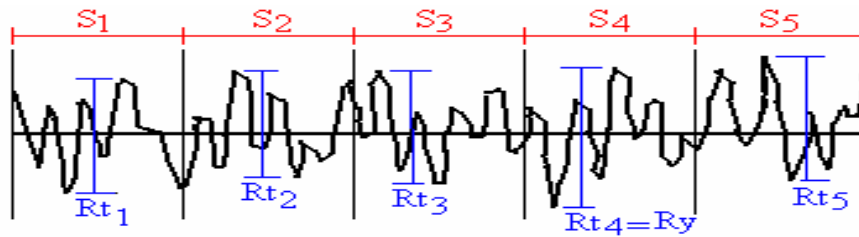
$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (11)$$

➤  $R_q$  - é um parâmetro que se baseia na medição da textura semelhante aquela empregada no  $R_a$ , contudo. Sua rugosidade é determinada por meio da Equação 12.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \cdot \int_0^L y^2(x) dx} \quad (12)$$

➤  $R_t$  - é um parâmetro que verifica a distância entre o mais alto pico e o mais baixo vale presente em cada parte da medição (Figura 17).

Figura 17 - Representação gráfica de uma superfície, mostrando os picos e vales de cada parte da medição, na determinação do  $R_y$ .



Fonte: NBR 4287.

- $R_y$  - é um parâmetro que representa o maior valor de  $R_t$ , entre todas as partes mensuradas da superfície. Na Figura 17, observa-se que o  $R_y$  é igual ao  $R_{t4}$ .
- $R_z$  - é um parâmetro que se baseia na média de todos os valores de  $R_t$ . Sua rugosidade é determinada por meio da Equação 13.

$$R_z = \frac{\sum R_t}{n} \quad (13)$$

- $S_m$  - é um parâmetro que se baseia na medição da textura de uma superfície por meio do comprimento de cada onda, denominadas isoladamente de S (Figura 17). O parâmetro é obtido pela média aritmética de todos os comprimentos Equação 14.

$$S_m = \frac{\sum S}{n} \quad (14)$$

As metodologias mais utilizadas para a qualificação da superfície usinada são a medição direta de caráter subjetivo, conforme apresentada pela ASTM D 1666-87 (1995) e a determinação do avanço por dente ( $f_z$ ). Essa determinação pode ser obtida por meio da Equação 15, utilizando os parâmetros de usinagem ou por meio da medição direta sobre a superfície usinada Equação 16.

$$f_{z\text{ calculado}} = \frac{V_f}{n \cdot z} \quad (15)$$

Em que:

$f_z$  calculado = avanço por dente, em mm;

$V_f$  = velocidade de avanço da peça, em m/min;

$n$  = frequência de rotação do eixo porta ferramenta, em min<sup>-1</sup>;

$z$  = número de gumes ativos da ferramenta (adimensional).

$$f_{z\text{ medido}} = \frac{DC}{NC - 1} \quad (16)$$

Em que:

$f_{z\text{ medido}}$  = avanço por dente, em mm;

$DC$  = distância conhecida, marcada sobre a superfície usinada, em mm;

$NC$  = número de cristas contadas dentro da distância conhecida (adimensional).

Na medida direta segundo ASTM 1666-87 (1995) são definidos alguns defeitos como arrancamento das fibras, lasqueamento e falhas de usinagem. Posteriormente, são atribuídas notas para qualificar a superfície. É importante salientar que a nota zero corresponde a melhor qualidade, sendo a superfície isenta de defeito e a nota 4 para a superfície com maior grau de defeitos.

Gurau et al. (2007) investigaram o efeito do tamanho do grão no processo da rugosidade do *oak european (Quercus robur)* lixado e medido por um padrão de análise da rugosidade modificado. A rugosidade do processo é separada da anatomia da madeira e ondulações usando um método baseado definido por *Abbot-Curve*, desenvolvido em um estudo de doutorado por Gurau em 2004.

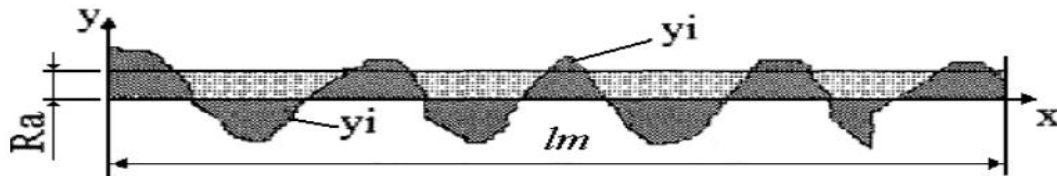
Tibúrcio (2010) apresenta neste trabalho, uma revisão sobre informações teóricas e tecnológicas dos elementos que envolvem a medição da rugosidade de madeiras. São apresentados os componentes e as fases que constituem todo o processo de fabricação de lixas e suas aplicações, bem como, informações sobre a rugosidade, as técnicas de medição mais empregadas, suas vantagens e desvantagens, além dos critérios empregados para avaliar a rugosidade de acordo com as NBR 6405, 1988; NBR 8404, 1988; NBR ISO 4288, 2008; NBR ISO 4287, 2002 e NBR ISO 12179, 2002. Teve como objetivo contribuir com pesquisadores envolvidos nos estudos sobre análise do acabamento superficial e aplicação de revestimentos em madeiras.

A seguir é apresentado o parâmetro mais utilizado na medição da rugosidade da madeira: Rugosidade média  $R_a$ . Matematicamente é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento ( $y_i$ ), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição ( $l_m$ ). Este parâmetro de avaliação da rugosidade (Figura 18) está representado como visto anteriormente pela Equação (11), novamente apresentada.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (11)$$

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

Figura 18 - Rugosidade média  $R_a$ ;  $y_i$  é o valor de um pico ou vale.

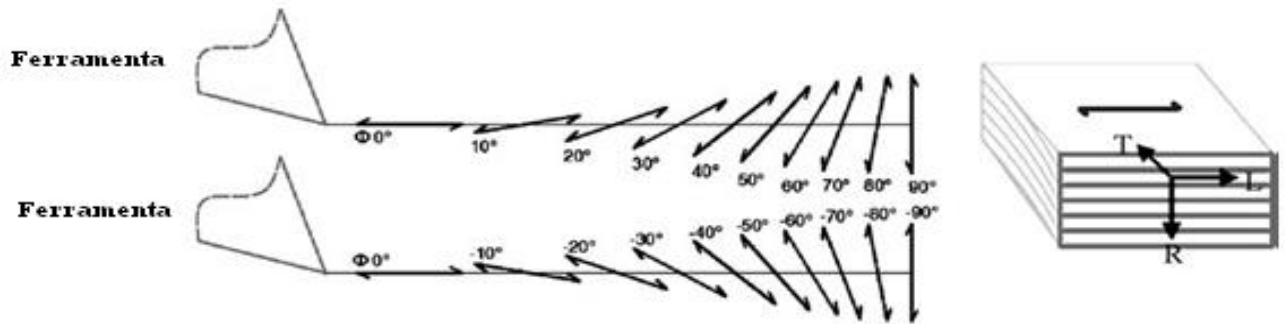


Fonte: NBR 4287.

Goli et al. (2009) pesquisaram o fresamento periférico da madeira com corte discordante e concordante, (existem dois métodos de fresar, o discordante (*up-milling*) e o concordante (*down-milling*), que são técnicas muito conhecidas a partir de um ponto de vista da geometria. No entanto, no processamento de materiais anisotrópicos como a madeira, estes aspectos geométricos implicam diferenças relevantes na usinagem. A fresagem de material anisotrópico leva a diferentes geometrias de corte quando discordante ou concordante, e quando aumenta ou diminui a profundidade de corte, resultando em grã de diferentes orientações dependendo do processo adotado. Os ensaios realizados quando ao processamento de *Douglas fir* com diferentes profundidades de corte e orientações de grã foram descritos. Embora, muito perto da repetição da máquina depois de 10 cortes de 0,05 mm, o erro absoluto ainda pode ser considerado igual a 0,05 mm. O corte final (0,5 mm ou 1,5 mm) foi feito no mesmo ciclo de funcionamento para reduzir erros de posicionamento como possível e minimizar o jogo da máquina. O corpo de prova era usinado ao longo e através da grã, variando a orientação da grã em passos de 10° para 10°. Descrever a orientação da grã com respeito à lâmina, um sistema proposto por McKenzie ( $\Omega-\Phi$ ) onde era usado  $\Omega$  é o ângulo entre a grã e o corte e a extremidade cortante e  $\Phi$  o ângulo entre a grã e o vetor de velocidade de corte. O ângulo  $\Omega$  foi mantido constante em 90° enquanto  $\Phi$  era variado. Quando  $\Phi = 0^\circ$  processado ao longo da grã, inclinando a grã conduz a processar com

( $0 < \Phi < 90$ ) ou oposto ( $0 > \Phi > -90$ ) a grã (ver Figura 19). As amostras eram processadas perto uma da outra o quanto possível para minimizar a variabilidade da madeira, e com a grã direita orientando a tábua.

Figura 19 - Orientação da grã e amostra tangencial, a face mais escura é a face que foi usinada.



Fonte: Adaptado de GOLI et al., 2009.

### 3.3.3. Usinagem da madeira à CNC

Ohuchi e Murase (2006) comentam que as máquinas CNC, são introduzidas nas linhas de produção das indústrias de usinagem de madeira e têm sido utilizados em condições de processamento com o objetivo de aumentar a produtividade.

O comando numérico é hoje o processo mais dinâmico para a fabricação de peças, constituindo um dos maiores desenvolvimentos para a automação de máquina separa a usinagem. O comando numérico exige um investimento inicial maior, pois suas máquinas são muito mais caras quando comparadas a máquinas de usinagem convencional. Entretanto, quando a aplicação é bem estruturada, o investimento é rapidamente compensado devido às inúmeras vantagens do processo, tais como: menor tempo de fabricação; projeto de peças mais complexas; maior qualidade do produto final e maior eficiência nos processos envolvidos. Embora o princípio de usinagem seja o mesmo, a maneira de se trabalhar em CNC é diferente da maneira convencional. Na usinagem convencional o operário é o principal elemento do sistema de produção. Cabe a ele grande parte, às vezes todas, as decisões sobre a execução do processo. Para a fabricação da peça o operário receberá como informação inicial: ordem de produção; desenho da peça; ferramentas a serem utilizadas. Com base nessas informações, cabe ao operário tomar todas as decisões remetentes ao processo de fabricação. Logo, a eficiência do processo está nas mãos da perícia do

operador. Cursos de aprimoramento e experiência obtida ao longo dos anos são essenciais para o operador, na usinagem convencional. Já na usinagem em CNC, existe um número de informações muito maior, tais como, a documentação da peça a ser usinada, entre elas: desenhos; planos de fixação; lista de ferramentas; dispositivos de fixação e instrumentos de medição; programa CNC, contendo dados de corte, sequencia de movimentos, funções auxiliares e etc; ferramentas montadas e posicionadas no porta-ferramentas da máquina; (GONÇALVES, 2000).

Na usinagem em CNC, as responsabilidades do operador são muito menores. As tarefas de interpretação e decisão são realizadas antes do processo de usinagem, pelo projetista e/ou pelo programador de CNC; (MARCO FILHO, 2013).

Lima et al. (2013) comentam que a seleção adequada da programação CNC pode influenciar na produtividade, ou seja, diminuir tempo e custo através do aumento da qualidade da vida da ferramenta e da qualidade da superfície da peça.

Magoss (2008) fez o estudo do acabamento superficial de 14 madeiras através do processo de fresamento CNC e a velocidade de corte variou de 10 a 50 m/s. A rugosidade foi medida através do rugosímetro com agulha de diamante. Concluiu-se que o aumento da velocidade de corte proporciona menores valores de rugosidade. Três amostras de 20 por 5 cm foram tangencialmente cortados de cada espécie de madeira e foram igualmente usinado com cabeça de fresagem afiada em uma fresadora CNC controlado por. Em cada espécime quatro superfícies de medição foram maquinados e deslocados em 0,3 mm para cada outro. Este método deve ter em conta o facto de que a colocação relativa do plano de corte e os vasos uns aos outros é aleatória. A velocidade de corte foi geralmente de 50 m/s, mas foram realizadas medições especiais para limpar o efeito da velocidade de corte sobre os diferentes parâmetros de rugosidade, especialmente sobre os parâmetros Abbott; a velocidade de corte variou entre 10 e 50 m/s.

As espécies de madeira macias são mais sensíveis à mudança de velocidade de corte e consequentemente resultam em superfícies mais ásperas.

Gawronski (2013) em estudo sobre a otimização das operações de fresamento de madeira em CNC para peças de mobiliário verificou que o método desenvolvido é verificado pela otimização da operação de fresamento de uma parte típica de móveis, ou seja, de fresamento de topo. Como resultado da transformação da otimização, o tempo foi reduzido em 54%.

Apesar das vantagens em se utilizar fresamento CNC para madeira e materiais a base de madeira ainda se faz necessário investigações para esse segmento, pois não se encontram na

literatura muitos trabalhos enquanto que a indústria madeireira necessita de produção rápida e com qualidade.

Pinheiro (2014) estudou o fresamento concordante e discordante em centro de usinagem CNC com ferramenta de metal duro. Utilizou a espécie de *Pinus elliottii* em diferentes teores de umidades para caracterizar a qualidade do produto através da rugosidade superficial em relação aos parâmetros de corte na usinagem. Foi realizado o fresamento concordante e discordante para 72 corpos de prova de dimensões 315 x 65 x 23 mm e em seguida foi feita a medida dos parâmetros de Rugosidade. O resultado da rugosidade média Ra demonstra diferenças estatísticas significativas para os dois sentidos de corte. Diferentemente da potência consumida que não apresentou diferenças estatísticas significativas. Conclui-se que o sentido discordante proporcionou as menores rugosidades, porém com alto consumo de potência.

#### **3.3.4. Materiais para ferramentas de corte**

A ferramenta de corte é a responsável pela usinagem; a formação do cavaco durante o processo ocorre na direção do gume da ferramenta, o que destaca ainda mais a importância da ferramenta (MACHADO 2009).

O material que compõe a ferramenta deve possuir principalmente dureza mais elevada do que a peça. Existem propriedades relativas a cada tipo de operação de usinagem, de material a ser usinado e parâmetros de corte. Porém são propriedades importantes e necessárias, tais como: a tenacidade, resistência ao desgaste, resistência a compressão, resistência ao cisalhamento, manter a resistência mecânica ao esforço térmico, resistência ao choque térmico e estabilidade química. Deste modo, é constante o surgimento de novos materiais, tais como ligas com propriedades mecânicas de alta resistência. Com base na composição química da ferramenta se dividem em grupos da seguinte forma: aços rápidos, cerâmica e cermet, ligas fundidas, nitreto de boro cúbico, diamante e metal duro (KRATOCHVIL, 2004; AMORIN, 2002 e DINIZ et al., 2013).

A seguir apresentam-se os principais materiais utilizados para ferramentas de corte, quais sejam: Aço Carbono - Aços Carbonos e Aços Ligados, eram os principais materiais utilizados nos primórdios da usinagem, com o desenvolvimento de materiais mais resistentes foram sendo substituídos, embora, encontre-se a sua aplicação hoje em usinagens de baixa velocidade de corte e em ferramentas de conformação, uma de suas principais limitações é que a sua dureza é

reduzida quando são aquecidos à faixa de temperatura de 300°C a 600°C. Callister (2012) define aço carbono como uma liga ferrosa onde o carbono é o principal elemento da liga.

Aço rápido - Aços rápidos tiveram grande impacto na construção de ferramentas de corte, sua velocidade de corte supera até dez vezes os Aços Carbonos e Aços Ligados; porém, comparado com os materiais atuais estas velocidades são baixas. Os aços rápidos foram desenvolvidos para suportar velocidade de corte alta, é composto de uma liga de tungstênio, molibdênio, cromo, vanádio, cobalto e nióbio. Suportam temperaturas de até 600°C, com alta resistência ao desgaste e alta dureza a temperatura ambiente, porém mantem dureza adequada durante o aumento da temperatura. Tenacidade é relativa aos elementos da liga, mas em geral são pouco tenazes. A ferramenta clássica é constituída de 18% de W, 4% de Cr e 1% V (FERRARESI, 1977; MACHADO et al., 2009 e DINIZ et al., 2013).

Cerâmicas - A ferramenta de cerâmica possui dureza ao quente e a frio, resistência ao desgaste e excelente estabilidade química. A cerâmica não é bom condutor térmico o que dificulta a transferência de calor e a região de contato ferramenta peça atinge altas temperaturas, prejudicando a tenacidade. Cerâmica composta de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) é mais tradicional, porém existe a cerâmica pura, cerâmica mista e pode ser reforçado com carbetos de silício, nitreto de carbono ou nitreto de cobalto. Esses reforços colaboram com o aumento da resistência mecânica e tenacidade da ferramenta (MACHADO et al., 2009 e DINIZ et al., 2013). Os Cermets são compostos de uma fase metálica e uma fase cerâmica por isso levam essa denominação, com carbonitreto de Titânio e o carbonitreto de Cobalto. Quando associados a velocidades de corte altas geram acabamentos finos e possuem maior resistência ao desgaste. Possuem dureza elevada, baixa tendência a difusão e adesão (TEIXEIRA et al., 2011).

Ligas fundidas - São ligas mais duras que o aço rápido, mantendo a dureza a temperaturas elevadas. As ligas fundidas são geralmente compostas por 3% de ferro, 17% de tungstênio, 33% de cromo e 44% cobalto, também podem ser compostas por tálio, titânio, vanádio, molibdênio e manganês. Resistem a temperaturas altas de aproximadamente 800°C e apresentam um tratamento térmico complexo, além de possuir preço elevado (MACHADO, 2009). Nitreto cúbico de boro (CBN) pode ser classificado com estrutura hexagonal e a estrutura cúbica. Trabalham com temperaturas altas de até 1927°C. A ferramenta convencional é classificada como PCBN com alto teor de CBN e pouco ligante. Existe também aquele com a fase ligante composta de titânio e carbono ou nitreto de alumínio ou nitreto de titânio. Por fim o CBN ligado

a wurtzita (HBN) que possuem alta tenacidade. O diamante possui elevada dureza e são utilizados quando se necessita de alta precisão. Quando aliado a alta velocidade de corte permite a maior produtividade. Porém, este tipo de ferramentas ainda não é utilizado em escala industrial devido ao preço e principalmente à baixa adesão entre o filme e o substrato (TEIXEIRA et al., 2011).

Metal duro - As máquinas envolvidas no processo de transformação da madeira exigem cada vez mais tecnologia para utilização em altas velocidades, bom acabamento e baixo desgaste. Para isso, a indústria madeireira utiliza o metal duro ou materiais sintetizados que são carbonetos, compostos de 81% de tungstênio, 6% de carbono e 13% de cobalto possuem elevada dureza, elevada resistência à compressão, elevada resistência ao desgaste e controle sobre a distribuição da estrutura (FERNANDES et al., 2011). O metal duro é composto por carbonetos que são adicionados em metal ligante. Geralmente são compostos por carboneto de tungstênio (WC) que está relacionado a resistência ao desgaste e o metal ligante cobalto (Co) que está relacionado à tenacidade. Também há metal duro com a adição de carboneto de titânio, para se aumentar a resistência à craterização, o de tântalo e de nióbio para maior tenacidade (FERRARESI, 1977; MACHADO, 2009 e DINIZ et al., 2013).

Xavier (2003) comenta que o metal duro foi desenvolvido para melhorar as propriedades físicas e mecânicas com a adição de elemento de liga, assim também apresenta uma melhora significativamente a durabilidade da ferramenta.

Farias et al. (2001) estudaram o incremento das forças em relação ao desgaste em uma ferramenta. Observa-se que para promover a remoção do material durante o processo necessita-se de velocidades altas, o aumento da potência e conseqüentemente vibrações, o que ocasiona problemas de desgaste da ferramenta e possíveis deformações na superfície da peça. Os corpos de prova e *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*, bem como de *Fagus sylvática* (Rotbuche) foram submetidos ao fresamento CNC tangencial e frontal para a medição da qualidade superficial, a força de usinagem e o desgaste da ferramenta. Os parâmetros de usinagem utilizados foram rotação de 15600 rpm, velocidade de avanço 23,4 m/min e profundidade de usinagem 10 mm. Ao longo do percurso observaram-se objetivos dentro dos intervalos 0, 6, 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 e 1400 m do percurso. Os resultados demonstram que o processo de desgaste da ferramenta para as duas qualidades de madeira de eucalipto ocorre relativamente mais rápida que para a madeira de *Rotbuche*, o que afirma que o Eucalipto se mostra mais abrasivo. O ensaio

realizado com ferramenta de metal duro provocou o desgaste de entalhe, com maior desgaste na região onde o gume não exerceu mais sua função de corte sobre a peça.

Pintaúde et al. (2000) investigaram desgaste abrasivo de ferramentas de corte utilizadas na indústria madeireira através da análise de diferentes ligas fundidas utilizadas. Foram utilizadas madeiras da região amazônica com duas ligas para ferramentas *Stellite* e duas ligas de metal duro do composto WC-Co. As mesmas foram submetidas a uma trajetória sobre a lixa, mantendo-se a velocidade de rotação constante aliadas ao movimento do disco e o deslocamento da mesa com velocidade de 20 mm/min. Conclui-se que os resultados superiores para a madeira foram os das ligas de metal duro, pois apresentou desempenho adequados de dureza, coeficiente de atrito e desgaste.

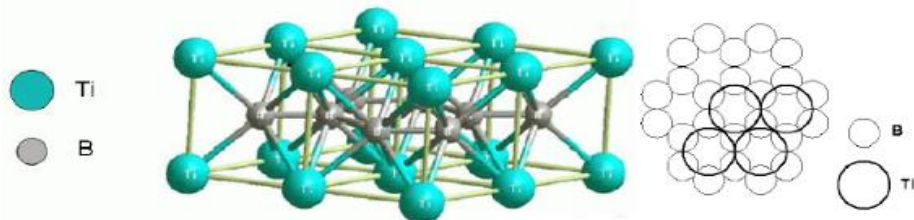
Os elementos adicionados são Carboneto de Titânio (TiC), Carboneto de Tântalo (TaC), Carboneto de Nióbio (NbC) e Nitreto de Titânio (TiN). O TiC possui característica eficiente de temperatura, devido ao menor atrito, diminui o calor. O TaC e NbC possuem alta resistência, devido ao refinamento do grão da matriz do metal duro. O TiN exibe uma maior estabilidade, deste modo evita diminui a difusão na ferramenta. Outro item importante na melhoria do desempenho das ferramentas se dá ao desenvolvimento de processos de revestimentos duros aplicados. Deste modo, ocorre a redução dos desgastes e conseqüentemente o aumento da produtividade na indústria (XAVIER, 2003; TEIXEIRA et al., 2011).

Teixeira et al. (2011) analisaram o desgaste de ferramentas de metal duro na indústria moveleira em relação a anisotropia da madeira, pois os principais fatores para este fato é a variabilidade na posição das fibras aliada ao caráter abrasivo da madeira. Para solucionar tais problemas é comumente utilizado ferramentas diamantadas por apresentarem alta resistência ao desgaste, porém ainda não são utilizadas nas indústrias por não apresentarem adesão entre o filme e o substrato adequados. A produção de ferramentas com filmes de diamante (PCD) em substrato de metal duro tem sido avaliadas para utilização nessas indústrias, pois apresentam propriedades de dureza à temperatura ambiente e à quente, alta tenacidade, grande resistência ao desgaste, entre outras características. Foi realizado o torneamento de madeira itaúba, com corte longitudinal às fibras (corte 0-90) e corte transversais as fibras (corte 90-90) da madeira. Os resultados demonstraram maior desgaste na ferramenta diamantada na direção de corte longitudinal as fibras. Conclui-se que as ferramentas com substrato de metal duro demonstraram desempenho adequado na usinagem de itaúba.

Kaczorowski et al. (2012) analisaram as arestas de corte antes e após o processo de usinagem, com a aplicação de revestimentos de carbono em condições de funcionamento. A usinagem foi realizada com rotação de 9000 rpm e velocidade de avanço de 16 m/ min e com ferramenta de metal duro aplicado em placas de aglomerado laminado que serão utilizados na indústria moveleira. Observaram que há necessidade de aplicar revestimentos à base de carbono na usinagem para este tipo de material. Foi realizada a análise do tamanho de corte, desgaste da ferramenta e qualidade da borda, pois na indústria de móveis, o consumo das ferramentas de corte pelas lâminas não é o critério mais importante é a qualidade da usinagem. Os revestimentos aplicados nos estudos permitiram assegurar uma adesão adequada e obter a redução do coeficiente de atrito. Esta diminuição com camadas de carbono foi de até 50%, tais resultados demonstram claramente que a tecnologia das ferramentas de corte é importante para a indústria moveleira.

Metal Duro com Revestimento - O revestimento de ferramentas de metal duro é bastante importante, pois pode garantir desempenho superior na usinagem, além de propiciar um custo mais acessível a esses materiais. O Metal Duro permite que as ferramentas deste material possam receber o processo PVD e também o CVD (Chemical Vapour Deposition) que utiliza temperaturas elevadas, não implicando em alterações metalúrgicas no metal duro (MACHADO, et al., 2011). Entre os revestimentos mais utilizados nas ferramentas de Metal Duro, encontramos TiC (Carboneto de Titânio), TiN (Nitreto de Titânio), filmes de diamante e  $Al_2O_3$  (Óxido de Alumínio). O  $TiB_2$  ou diboreto de titânio é um novo revestimento que aos poucos tem sido introduzido no mercado, consiste em um composto cerâmico de estrutura hexagonal onde os átomos de boro formam uma rede ligada covalentemente na matriz do titânio como ilustrado na Figura 20 (CABRAL, 2012).

Figura 20 - Rede hexagonal de átomos de boro na matriz de titânio.



Fonte: (CABRAL, 2012).

### 3.3.5. Potência consumida na usinagem

Ferraresi (1977) relata que a força de usinagem é a força total que atua sobre uma cunha cortante durante o processo.

Na usinagem o consumo de potência demonstra o desempenho do corte, segundo (GONÇALVES et al., 1998).

Diniz et al. (2013) relatam que as forças de usinagem são consideradas como uma ação da peça sobre a ferramenta, a força total resultante que atua sobre a cunha cortante durante a usinagem é denominada força de usinagem. Ainda, Ferraresi (1977) e Diniz et al. (2013) a potência de corte é o produto da força de corte com a velocidade de corte, Equação 17:

$$N_c = \frac{P \cdot v}{60 \cdot 10^3} \quad (17)$$

No qual  $N_c$  é a potência de corte em kW,  $P$  é a força de corte em Newton,  $v$  é a velocidade de corte em metros por minuto.

Já a potência de avanço  $N_a$  é o produto da força de avanço com a velocidade de avanço, Equação 18.

$$N_a = \frac{P_a \cdot v_a}{60 \cdot 10^3} \quad (18)$$

A potência fornecida pelo motor nas máquinas para um único motor é dado pela Equação 19:

$$N_m = \frac{N_c}{\eta} \quad (19)$$

No qual  $N_m$  é a potência fornecida pelo motor em kW,  $N_c$  é a potência efetiva de corte em kW,  $\eta$  é o rendimento da máquina.

É possível determinar a potência da usinagem através da tensão e da corrente elétrica consumida, para motores trifásicos deve se acrescentar a  $\sqrt{3}$ , pois a corrente em uma ligação em triangulo de bobinas são multiplicados por esse valor. Através da Equação 20 é possível obter a potência aparente para motores trifásicos:

$$P_{ap} = U \cdot i \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\varphi \quad (20)$$

No qual  $P_{ap}$  é a potência aparente para motor trifásico em Watts,  $U$  é a tensão de uma das fases em Volts,  $i$  é a corrente alternada de uma das fases em Amperes e o  $\cos\varphi$  é a fator de potência (MACHADO et al.; 2011).

Por Pinheiro (2014) para a transformação do dado adquirido em Volts para Amperes utiliza-se a Equação 21, porém, se for necessário utilizar um transformador de corrente de redução 25A/5A, a variável  $U_{CC}$  deve ser multiplicada por 5.

$$i = \frac{U_{cc} \cdot 5}{2} \quad (21)$$

Onde  $i$  é a corrente em Amperes e  $U_{CC}$  é a tensão da corrente contínua em Volts. Substituindo o valor da corrente Equação (20), o valor da tensão de fase do motor da ferramenta (220 V) e o fator de potência (0,92) do motor, têm-se a Equação 22, que será utilizada para transformar o sinal adquirido em Volts para potência consumida em Watts.

$$P_{apF} = \frac{U_{cc} \cdot 5 \cdot (220) \cdot (0,92)}{(2)} \cdot \sqrt{3} \quad (22)$$

Ferraresi (1977) e Diniz et al. (2013) relataram que a força de usinagem depende de fatores como, material da peça, área da seção de corte, espessura, geometria e ângulo de posição e velocidade de corte. Já os fatores que influenciam as forças de avanço e profundidade são o raio da ponta da ferramenta, ângulos de posição e inclinação.

Saloni et al. (2005) caracterizaram o processo de usinagem abrasiva para compreender as variáveis que afetam significativamente a taxa de remoção de material, a qualidade da superfície e o consumo de energia.

Souza (2009) avaliou a potencialidade de clones *Eucalyptus sp* para usinagem na indústria moveleira. A amostra de dimensão 19 x 127 x 900 mm em ensaios de corte paralelo transversal às fibras com rotação de 18000 rpm, velocidade de avanço manual e profundidade de usinagem de 2,5 mm. A estatística demonstrou diferenças significativas nos clones de *E. camaldulensis* e *E.*

*urophylla*. Ocorreu com pouca frequência a aspereza, lascamento e queima da superfície, características essenciais para a indústria moveleira.

Souza et al. (2011) investigaram a energia específica de corte em serra circular para avaliar o consumo de energia. Deste modo, sabe-se que a velocidade de avanço, velocidade de corte e a escolha da ferramenta tem relação direta com o tempo e a potência. Conclui-se que as maiores velocidades de corte, menores velocidades de avanço e serra circular de 40 dentes consumiram mais energia específica de corte, ou seja, potência.

Gontijo (2012) estudaram a energia específica em cortes transversais em madeira roliça de *Eucalyptus* sp. Os parâmetros de velocidades de corte e de avanço estão relacionados a redução do tempo e da potência aliados a escolha da ferramenta. A potência tende a diminuir com o aumento da velocidade de avanço e redução da velocidade de corte, porém para madeira a baixa velocidade de corte acarreta em superfícies mais ásperas. Utilizou-se *Eucalyptus urophylla* e um híbrido de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus urophylla* serradas em quatro serras circulares com quatro velocidades de avanço de 11, 14, 17, e 20 m/min e cinco velocidades de corte de 36, 41, 46, 51 e 56 m/s. Os resultados demonstraram que não se deve trabalhar com velocidade de corte menor ou igual a 36 m/s, pois nessa velocidade sobrecarrega o motor. Maiores velocidades de corte e menores velocidades de avanço consomem mais energia, porém resultam em melhores acabamentos para a madeira.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo apresenta-se a origem da madeira utilizada e os métodos de: preparação dos corpos de prova, densidade aparente das amostras, potência consumida, rugosidades superficiais e a realização dos testes de usinagem em uma fresadora CNC.

### 4.1. ORIGEM DA MADEIRA PARA OS TESTES E A FRESADORA CNC

As peças de madeira de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*, objeto da pesquisa, foram adquiridas em uma serraria no município de Bauru/SP, pelo grupo de pesquisa do laboratório do Campus experimental da UNESP de Itapeva/SP. Estas foram submetidas ao processo de aplainamento em plainas, desempenadeira e desengrossadeira, definindo-se uma seção transversal das peças das madeiras com superfícies isentas de irregularidades quanto ao empenamento.

#### 4.1.1. Densidade Aparente das Madeiras

A metodologia utilizada para a determinação da densidade aparente das madeiras de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*, é definida pela NBR 7190 (1997). Foi utilizada a Equação 4 para os cálculos das densidades aparente. Para a determinação da densidade aparente, os corpos de prova foram pesados em balança de precisão de 0,01 g e determinados o seu volume através de medição das peças por um paquímetro com acuracidade de 0,05 mm.

A faixa do teor de umidade, qual seja  $12\% \pm 4\%$ , medida e controlada pelo instrumento de medição do teor de umidade, especificação do medidor de umidade: marca DIGISYSTEM, modelo DL 822; o teor de umidade registrado foi de 10,8%, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Detalhe de medição da umidade em peça de madeira de *Eucalyptus* após secagem por ventilação forçada. (teor de umidade registrado de  $10,8\% \pm 4\%$ ).

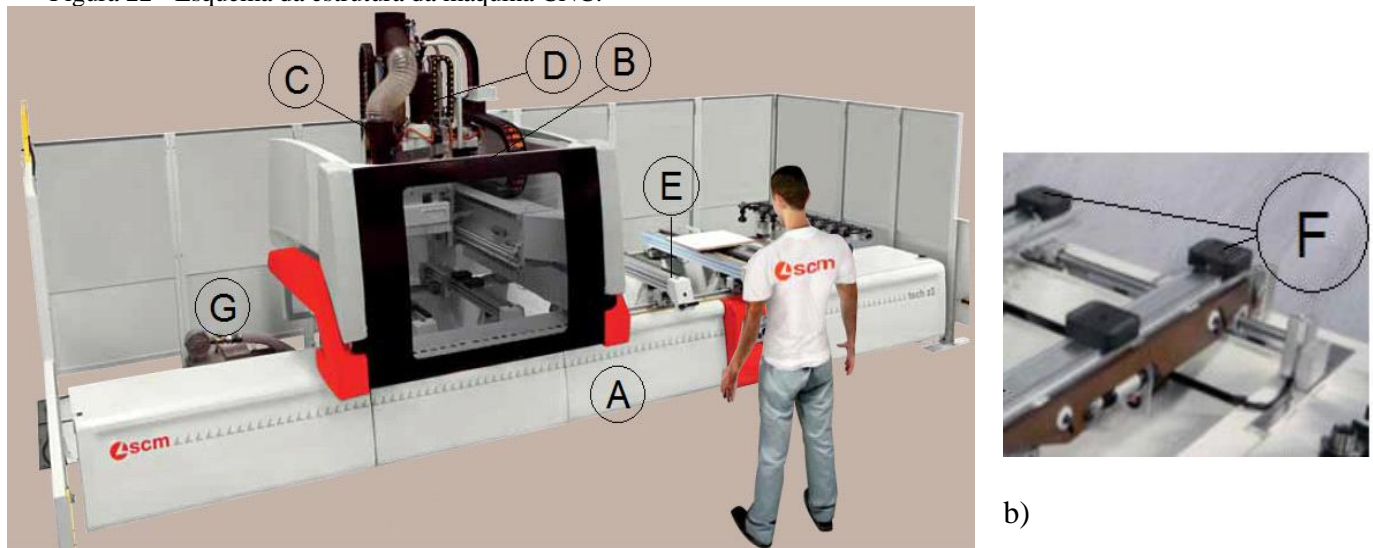


Fonte: Autor.

### 4.1.2. Fresadora CNC

A preparação dos CDPs deu-se no Laboratório de Usinagem e Automação, na UNESP - Campus de Itapeva/SP, utilizando uma Furadeira - Fresadora - CNC Tech Z1 da empresa SCM GROUP S.P.A (2011). A estrutura da fresadora é constituída de base portante (A); monobloco (B) com translado ao longo do eixo X , grupo operador (C) composto por uma cabeça de perfuração onde é possível montar electromandris, fresas de disco, etc, disposto sobre uma prancha (D) que se movimenta sobre o monobloco móvel (B) ao longo do eixo Y e ao longo do eixo Z, os trilhos(E) para deslocamento das ventosas. E em (G) o circuito integrado da máquina, com seus comandos numéricos e ar condicionado da máquina CNC ilustrado na Figura 22a. Na Figura 22b pode ser observado a ventosa (F) para fixação das peças a serem fresadas.

Figura 22 - Esquema da estrutura da máquina CNC.



a)

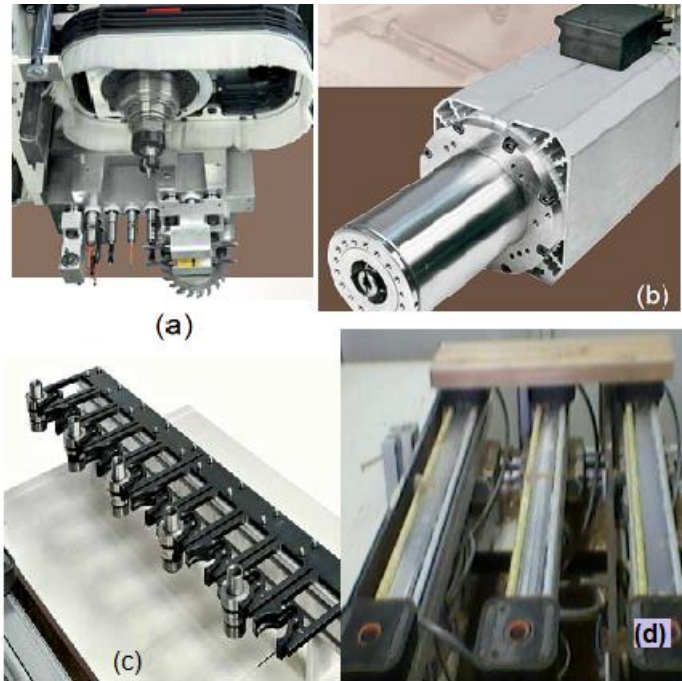
Fonte: Adaptado Catálogo TECH Z1 2011.

### 4.1.3. Dispositivos utilizados na fresadora

Na fresadora CNC foi utilizados os dispositivos para perfuração com 8 mandris verticais, 5 (cinco em sentido “X”, 3 (três) em sentido “Y”); 2+2 mandris horizontais em sentido “X”; 1+1 mandris horizontais em sentido “Y”; unidade serra integrada: Fresa vertical de 6,6 (S1) / 7,5 (S2) kW (9/10Hp) e dispositivo lateral de 10 posições – HSK 63. Em Figura 23a) a unidade de operação; Figura 23b) o mandril; o porta ferramentas em detalhe visto em Figura 23c), sendo um

dispositivo lateral de 10 posições e em Figura 23d) a fixação do CDP nas ventosas pneumáticas do centro de usinagem.

Figura 23 - (a) Unidade de operação, (b) Mandril, (c) Dispositivo lateral de 10 posições e (d) CDP fixado nas ventosas pneumáticas.

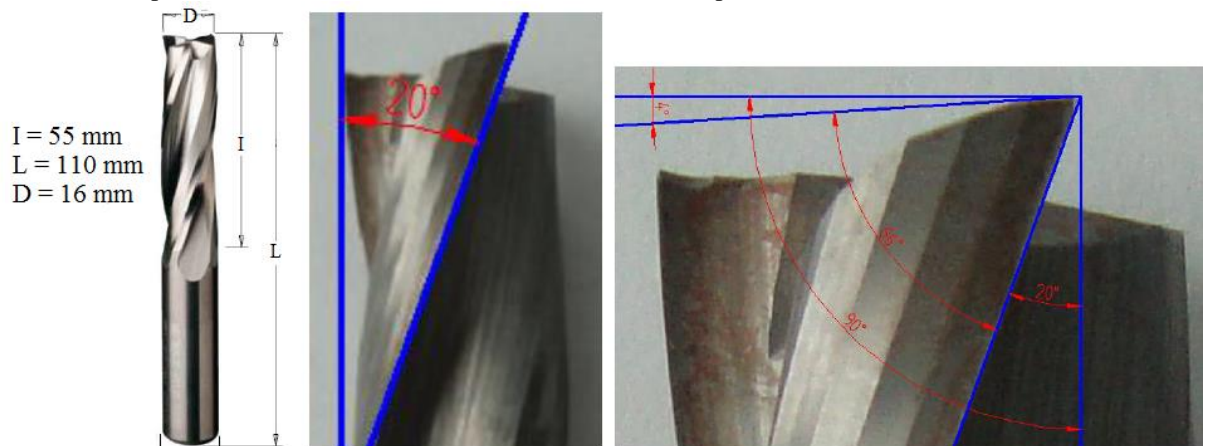


Fonte: Adaptado Catálogo TECH Z1 2011.

#### 4.1.4. Ferramenta utilizada

Em Figura 24 visualiza-se a fresa utilizada.

Figura 24 – Fresa de topo com três arestas de corte em hélice de metal duro para acabamento.



Fonte: Pinheiro (2014).

A fresa Premium - Upcut Spiral Bit, com diâmetro de 16 mm, comprimento de 90 mm e l de 35 mm com três cortes helicoidais positivos com ângulo de hélice de 20°, ângulo de folga de 4°, ângulo de cunha de 66° e ângulo de saída de 20°, especificações do fabricante CMT – código nº 195.161.11.

#### 4.1.5. Parâmetros de usinagem

Os parâmetros utilizados nos ensaios de fresamento tangencial e frontal são descritos no Quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros utilizados nos ensaios de usinagem.

<b>S (rpm)</b>	7000	10000	13000	16000
<b>V<sub>c</sub> (m/min)</b>	351	502	653	804
<b>V<sub>c</sub> (m/s)</b>	5,9	8,4	10,9	13,4
<b>V<sub>f</sub> (m/min)</b>	3	5	7	9
<b>f<sub>z</sub> (mm)</b>	0,143	0,167	0,179	0,188
<b>a<sub>p</sub> - Frontal (mm)</b>	5	5	5	5
<b>a<sub>p</sub> - Tangencial (mm)</b>	1	1	1	1

Fonte: Autor.

As madeiras foram fresadas na direção tangencial, nas técnicas: concordante e discordante, assim como as bordas com a<sub>p</sub> de 1,0 mm; e na direção frontal nos sentidos perpendicular e paralelo às fibras com a<sub>p</sub> de 5,0 mm.

Para o fresamento tangencial e frontal, fresados no mesmo corpo de prova, sendo num total de 8 corpos de prova de cada espécie de madeira; portanto, 16 CDPs.

Nos ensaios de fresamento tangencial concordante e discordante das laterais, com a<sub>p</sub> de 1,0 mm, se manteve a V<sub>c</sub> de 10,9 m/s e variaram-se as V<sub>f</sub> em 3; 5; 7 e 9 m/min e logo em seguida foi mantida a V<sub>f</sub> de 5 m/min, variando-se as V<sub>c</sub> em 5,9; 8,4; 10,9; 13,4 m/s, com 6 repetições em cada direção, sendo as medidas de R<sub>a</sub> realizadas no sentido contrário e a favor ao corte realizado pela ferramenta.

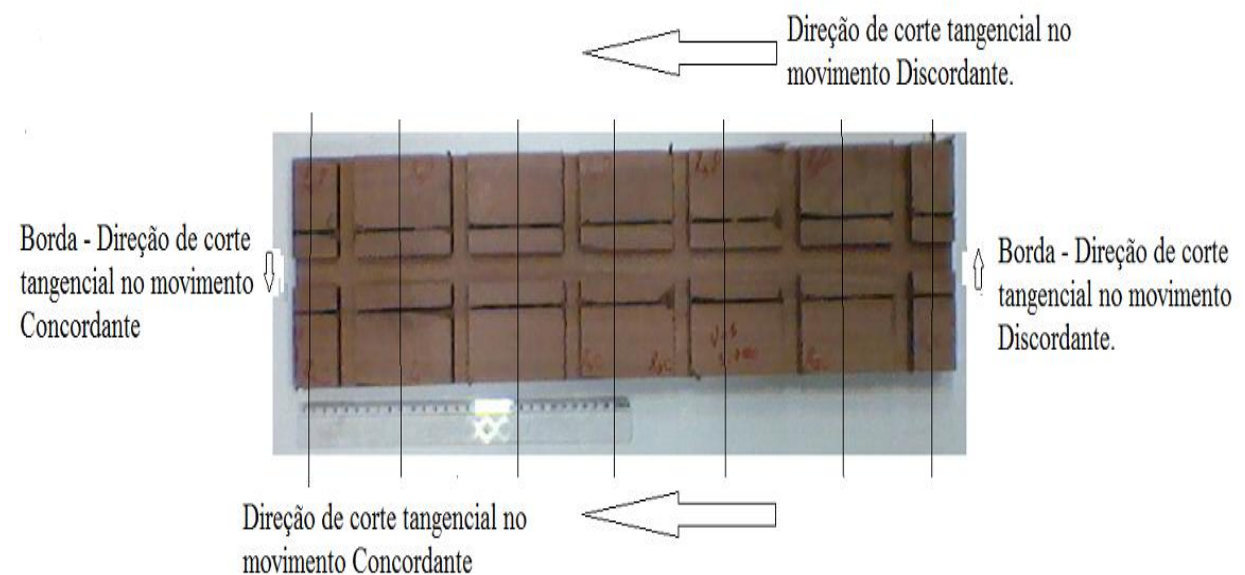
Em seguida, as madeiras foram fresadas na direção frontal, nos movimentos de corte paralelo e perpendicular às fibras da madeira, com a<sub>p</sub> de 5,0 mm e mesmos parâmetros utilizados

no ensaio de fresamento tangencial concordante e discordante das laterais mencionados acima, sendo as medidas de  $R_a$  realizadas no sentido paralelo e perpendicular ao corte da ferramenta.

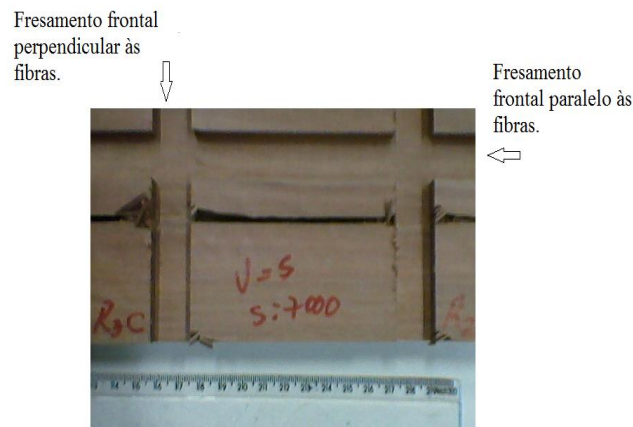
Nas bordas a madeira foi fresada na direção tangencial com movimentos de corte concordante e discordante com  $a_p$  de 1,0 mm com os mesmos parâmetros de  $V_c$  e  $V_f$  descritos acima no corte tangencial concordante e discordante das laterais da amostra, com 1 repetição em cada movimento de corte concordante e discordante e parâmetros de corte.

Na Figura 25a) visualiza-se o CDP, indicando a direção de corte tangencial concordante e discordante das laterais e bordas da amostra e Figura 25b); o fresamento frontal, indicando o  $F_{pa}$  e  $F_{pp}$  às fibras da madeira, estes processos foram realizados na CNC.

Figura 25 – a) Indicação do fresamento tangencial concordante e discordante, nas laterais da amostra assim como em suas extremidades. b) Indicação do  $F_{pa}$  e  $F_{pp}$  às fibras da madeira.



a)



b)

Fonte: Autor.

Totalizando 416 ensaios, como pode ser visto no Quadro 4, onde especifica as direções de corte (tangencial, frontal e borda); os movimentos de corte tangencial (concordante e discordante), frontal (paralelo às fibras e perpendicular às fibras) e borda (tangencial concordante e tangencial discordante) e os parâmetros utilizados na pesquisa.

Quadro 4 - Total de ensaios realizados e parâmetros utilizados no fresamento.

Direção de Corte:	Movimentos de Corte:	Nº de Repetições	Para as Madeiras:	Parâmetros de velocidades de corte e avanço variáveis nos ensaios.	
Tangencial	Concordante	6	<i>Citriodora</i> e <i>Saligna</i>	Quando se manteve a $V_c = 10,9$ m/s Variaram-se as $V_f$ em:	Quando se manteve a $V_f = 5$ m/min Variaram-se as $V_c$ em:
	Discordante	6			
Frontal	Paralelo	6		3 (m/min)	5,9 (m/s)
	Perpendicular	6		5 (m/min)	8,4 (m/s)
				7 (m/min)	10,9 (m/s)
				9 (m/min)	13,4 (m/s)
Borda	Concordante	1			
	Discordante	1			
Números de repetições		26	X 2= 52	52X4 = 208	52X4 = 208
Total de Ensaios			→	416	

Fonte: Autor.

Em seguida, os CDPs do ensaio realizado na CNC, foram esquadrejados na seccionadora TECMATIC FIT 2.9 onde se extraíram seis novos corpos de prova de dimensões: *citriodora* 95,8 x 130 x 27 mm e *saligna* 95 x 123 x 25 mm, visualiza-se esta operação na Figura 26, correspondendo ao do CDP R3.

Figura 26 - a) CDPs usinados em serra seccionadora TECMATIC e b) CDP retirado.



a)

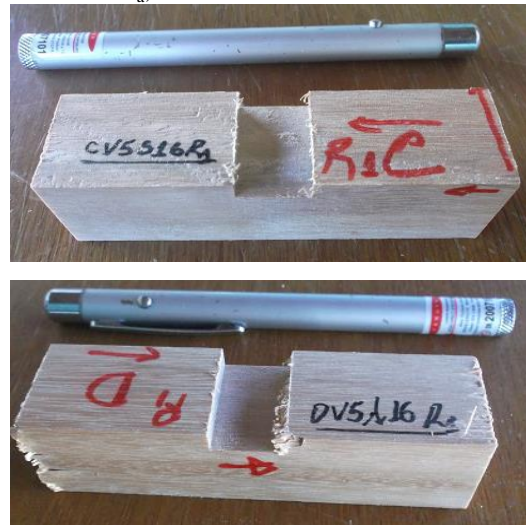


b)

Fonte: Autor.

Na Figura 27 podem ser observados os CDPs para análise de  $R_a$  quando a  $V_f$  foi de 5 m/min para retirada do CDP R1. Estes CDPs obtiveram as novas dimensões de 95,8 x 25 x 27 mm (*citriodora*) e 95 x 24 x 25 mm (*saligna*).

Figura 27 – CDPs retirados para medida de  $R_a$ , concordante e discordante.



Fonte: Autor.

Novamente foi realizado o esquadrejamento das peças, que após a retirada de suas laterais como indicado na Figura 28; para obter assim os CDPs para a medição de  $R_a$  do corte do fresamento na direção frontal em movimentos de corte paralelo e perpendicular às fibras da madeira, possuindo as dimensões de 95,8 x 75 x 27 mm (*citriodora*) e 95 x 71 x 25 (*saligna*).

Figura 28 – Retirada dos CDP para medida de  $R_a$ , frontal.



Fonte: Autor.

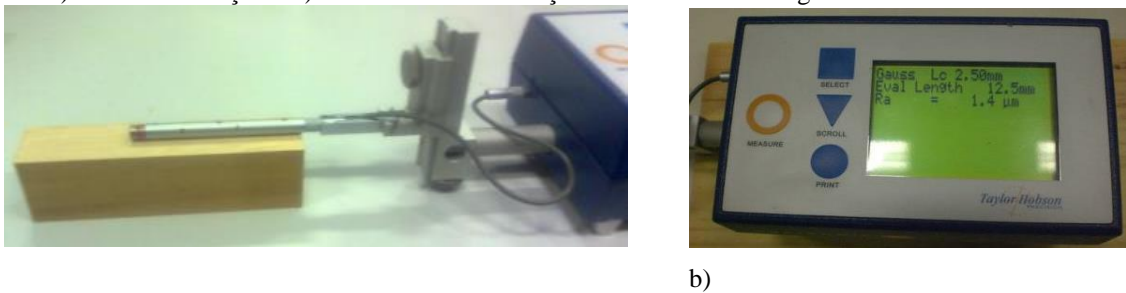
Das dimensões da Figura 28 os CDPs do ensaio do fresamento tangencial concordante e discordante das bordas, nas dimensões 95,8 x 25 x 27 mm (*citriodora*) e 95 x 24 x 25 (*saligna*), assim como os retirados conforme ilustrou a Figura 27 dos CDPs para medir a rugosidade  $R_a$  no fresamento tangencial nas direções concordante e discordante; no entanto, nesta medida de borda a medida será realizada perpendicularmente ao CDP onde foi fresado.

Ao final os CDPs foram acondicionados em sacos de polietileno e lacrados, sendo esses abertos somente no momento da medição da rugosidade.

## 4.2. EQUIPAMENTO E METODOLOGIA DE RUGOSIDADE

A medição das rugosidades média  $R_a$  foi realizada com o rugosímetro: Modelo SURTRONIC 25+; marca TAYLOR HOBSON como ilustrado na Figura 29. O comprimento de amostragem adotado nas medições foram segundo a NBR 6405 (ABNT, 1988), com percurso de medição ( $l_m$ ) para cut-off 2,5 mm é de 12,5 mm, resultando na média de 5 valores adquiridos por medição. O range adotado no rugosímetro foi de 300  $\mu\text{m}$ , o filtro adotado foi Gaussiano e o parâmetro medido foi o  $R_a$  (rugosidade média).

Figura 29 - a) Haste de medição e b) Detalhe de uma medição realizada com o Rugosímetro.

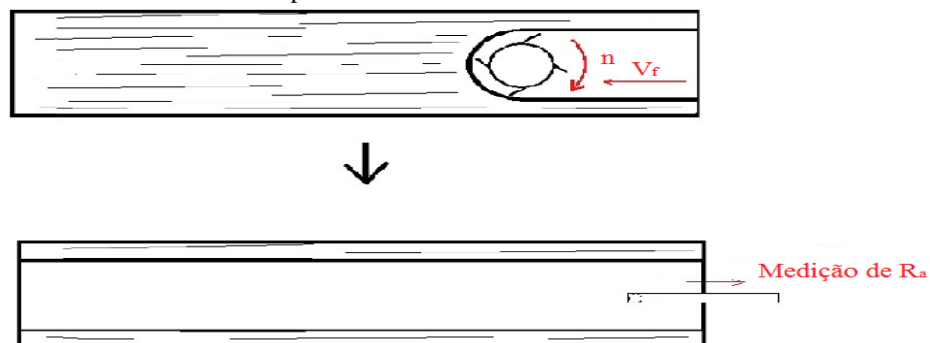


Fonte: Autor.

### 4.2.1. Medida de $R_a$ no fresamento frontal paralelo às fibras

As representações esquemáticas das medidas de  $R_a$  realizadas no fresamento frontal e tangencial paralelo e perpendicular às fibras, no fresamento tangencial concordante e discordante perpendicular às fibras (medidas a favor e contra as direções de corte) e no fresamento tangencial concordante paralelo e perpendicular às fibras da madeira (medidas a favor e contra as direções de corte) são mostradas a seguir. A representação esquemática da medida de  $R_a$  no fresamento frontal paralelo às fibras e a direção estão ilustrados na Figura 30.

Figura 30 - Medida no fresamento frontal paralelo às fibras.

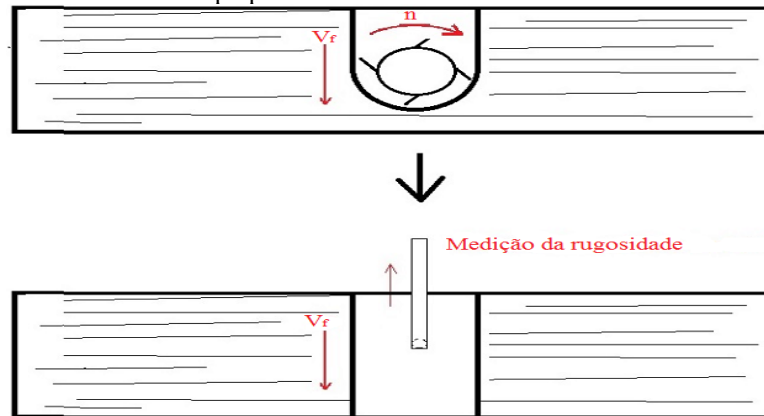


Fonte: Autor.

#### 4.2.2. Medida de $R_a$ no fresamento frontal perpendicular às fibras

A representação esquemática da medida de  $R_a$  no fresamento frontal perpendicular às fibras e sua direção está em Figura 31.

Figura 31 - Medida no fresamento frontal perpendicular às fibras.

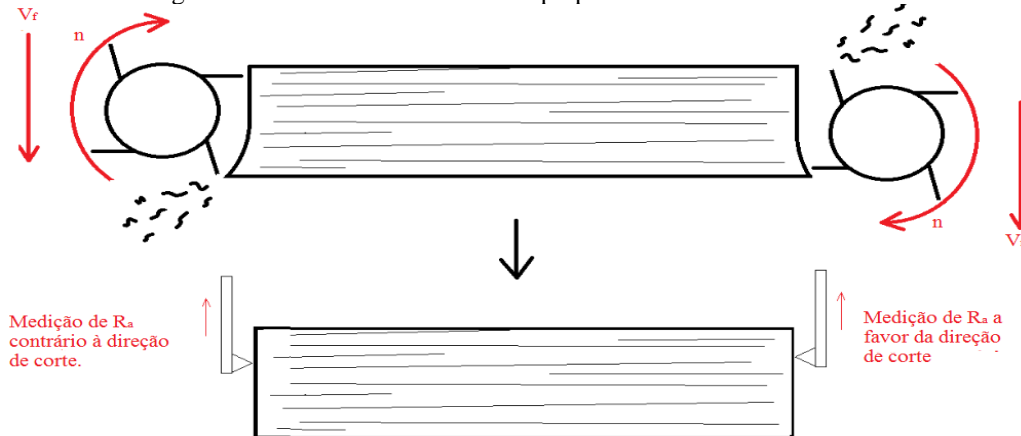


Fonte: Autor.

#### 4.2.3. Medida de $R_a$ no fresamento tangencial concordante e discordante perpendicular às fibras da madeira

A representação esquemática da medida de  $R_a$  no fresamento tangencial concordante e discordante perpendicular às fibras da madeira a favor e contra a direção de corte está ilustrada conforme segue, em Figura 32.

Figura 32- Fresamento tangencial concordante e discordante perpendicular às fibras.

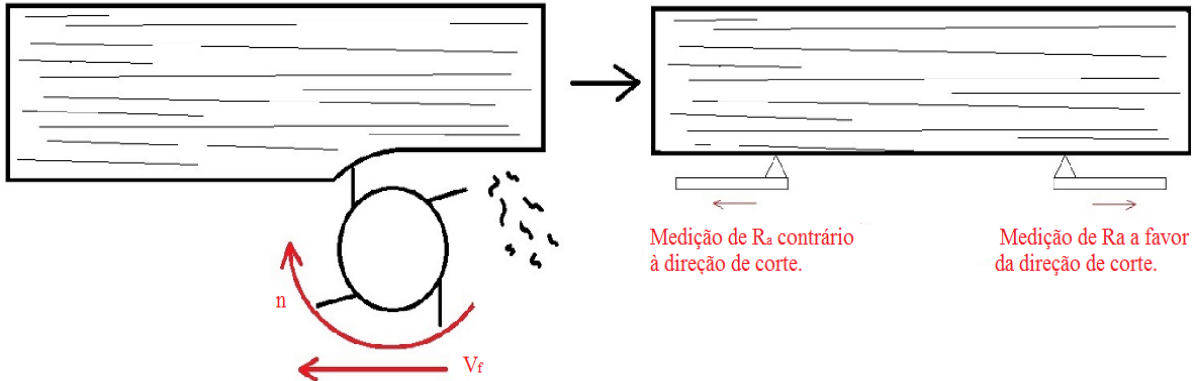


Fonte: Autor.

#### 4.2.4. Medida de $R_a$ no fresamento tangencial concordante paralelo às fibras

A representação esquemática da medida de  $R_a$  no fresamento tangencial concordante paralelo às fibras da madeira a com a indicação de como as medidas foram realizadas, ou seja; a favor e contra a direção de corte, estão ilustrados conforme a Figura 33.

Figura 33 - Fresamento tangencial concordante paralelo às fibras.

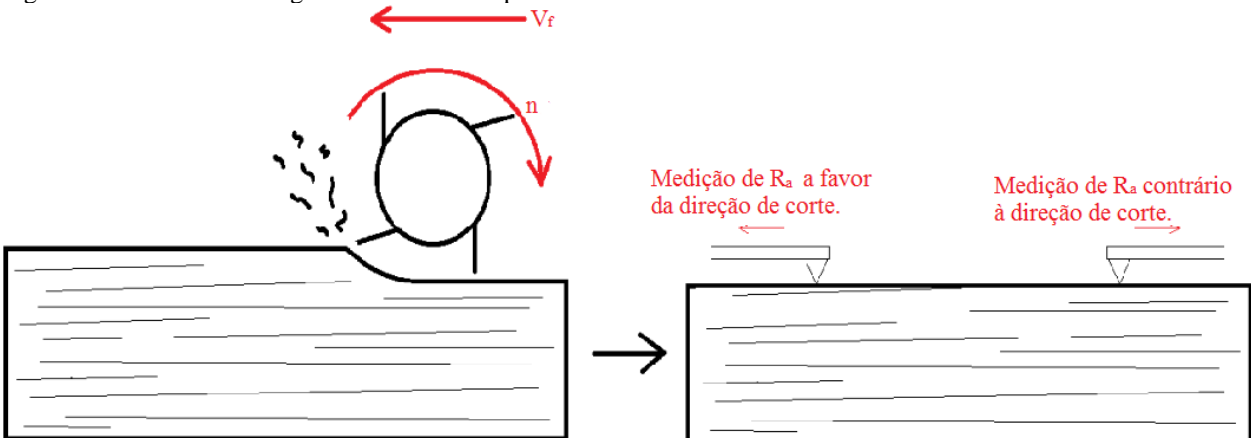


Fonte: Autor.

#### 4.2.5. Medida no fresamento tangencial discordante paralelo às fibras

A representação esquemática da medida de  $R_a$  no fresamento tangencial discordante paralelo às fibras da madeira a favor e contra a direção de corte está ilustrada na Figura 34.

Figura 34 - Fresamento tangencial discordante paralelo às fibras.



Fonte: Autor.

#### 4.3. POTÊNCIA DE CORTE CONSUMIDA

A potência de corte consumida foi obtida através da captação da variação da corrente elétrica utilizando-se de um transformador da marca Renz, modelo RH-40, com redução de 25A (Ampères) para 5 A, este transformador reduziu a corrente que foi coletada pelo sensor de efeito Hall da marca LEM, modelo AT 5 B10 (Figura 35a), que realiza a medição eletrônica de correntes alternada. Ele possui saída de tensão 0-10 V DC proporcional ao valor RMS da corrente primária. Este sensor de efeito Hall foi conectado externamente aos cabos de alimentação do motor responsável pela rotação da ferramenta, para a captação da variação da corrente elétrica. O sensor foi conectado a um módulo de canais da marca National Instruments modelo BNC-2120, e este conectado a placa de aquisição de dados marca National Instruments modelo NI PCI 6220 (Figura 40b), conectado ao computador de aquisição de dados posicionado ao lado do centro de usinagem (Figura 40c). Os sinais adquiridos através da placa foram processados e armazenados através de um programa pré-elaborado no software LABVIEW versão 7.1 (Figura 40d).

Figura 35 – a) Computador para armazenar e adquirir os dados, b) módulo de canais da marca National Instruments modelo BNC-2120, c) sensor de efeito Hall da marca LEM, modelo AT 5 B10. d) Aplicativo para aquisição de dados desenvolvidos LABVIEW versão 7.1.



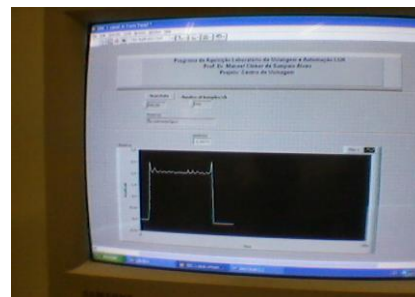
a)



b)



c)



d)

Fonte: Autor.

O sinal de diferença de potencial gerada pela corrente foi captado pelo sensor de efeito Hall e coletada pela placa de aquisição de dados.

A variação da corrente elétrica na usinagem foi adquirida instantaneamente para cada corpo de prova usinado a uma taxa de 400 pontos por segundo através do sensor de efeito Hall instalados no centro de usinagem.

A potência consumida foi calculada através da Equação 19, o sinal adquirido (em  $U_{CC}$ ) a uma taxa de 400 pontos por segundo foi transformado na unidade de potência (Watts).

Como o sinal adquirido pelo sistema tem uma saída proporcional em Volts é necessário converter o valor de Volts para Ampéres para que se possa aplicar esse valor na Equação 20.

O fabricante do transdutor de corrente alternada fornece essa equação para a transformação do dado adquirido em Volts para Ampéres de acordo com a Equação 21); porém, como foi necessário utilizar um transformador de corrente de redução 25A/5A, a variável  $U_{CC}$  foi multiplicada por 5.

Substituindo o valor da corrente obtido da Equação 21 novamente, o valor da tensão de fase do motor da ferramenta (220 V) e o fator de potência (0,92) do motor, utilizou-se a Equação 21, para transformar o sinal adquirido em Volts para potência consumida em Watts.

#### 4.4. ANÁLISE DAS IMAGENS

Para análise da superfície usinada utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV), Zeiss EVO LS-15 com aberturas para o modo EP (pressão estendida), em atmosfera de N<sub>2</sub>, a 5 kV (microscopia de baixa voltagem) em pressões da ordem de 60 Pa, coletando o sinal de elétrons retro espalhados com o detector VPSE-G3. Este microscópio está instalado no campus da Unesp de Guaratinguetá, na Faculdade de Engenharia. Os corpos de prova para a microscopia e suas dimensões foram de 10 mm por 10 mm e 5 mm de espessura.

Foram escolhidos os ensaios em condições extremas, os corpos de prova (em posições aleatórias das amostras) do fresamento tangencial no sentido concordante e discordante na velocidade de avanço de 3 e 9 m/min e profundidade de corte de 1,0 mm e para as velocidades de corte 10,9 m/s. Para o fresamento frontal a velocidade de corte 10,9 m/s, e velocidades de avanço de 3 e 9 m/min e profundidade de corte de 5,0 mm.

O microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO LS-15, está ilustrado na Figura 42.

Figura 36 - Microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO LS-15.



Fonte: Autor.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. DENSIDADE APARENTE

Os valores médios de densidade aparente das espécies estão indicados na Tabela 1 e foram calculadas conforme Equação 4, com teor de umidade  $12\% \pm 4\%$ .

Tabela 1- Densidades aparente das espécies *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus saligna*.

<b>Média das densidades aparente das espécies <i>Corymbia citriodora</i> e <i>Eucalyptus saligna</i>.</b>	
<i>Corymbia citriodora</i>	<i>Eucalyptus saligna</i>
0,959 g/cm <sup>3</sup>	0,945 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Autor.

A densidade aparente de *Corymbia citriodora* encontrada na literatura está entre de 0,980 g/cm<sup>3</sup> até 1,180 g/cm<sup>3</sup> (BENJAMIN, 2006). O que evidencia que a densidade encontrada para esta madeira está dentro do esperado quando comparado com a literatura.

Alzate, 2004 obteve as médias da densidade aparente máxima do lenho das árvores de clone de *Eucalyptus saligna* indicaram a densidade mais baixa de 0,890 g/cm<sup>3</sup> e mais alto de 1,020 g/cm<sup>3</sup>, evidenciando que a densidade encontrada para esta madeira está dentro do esperado quando comparado com a literatura.

### 5.2. ANÁLISE DA QUALIDADE SUPERFICIAL ( $R_a$ ) E POTÊNCIA CONSUMIDA

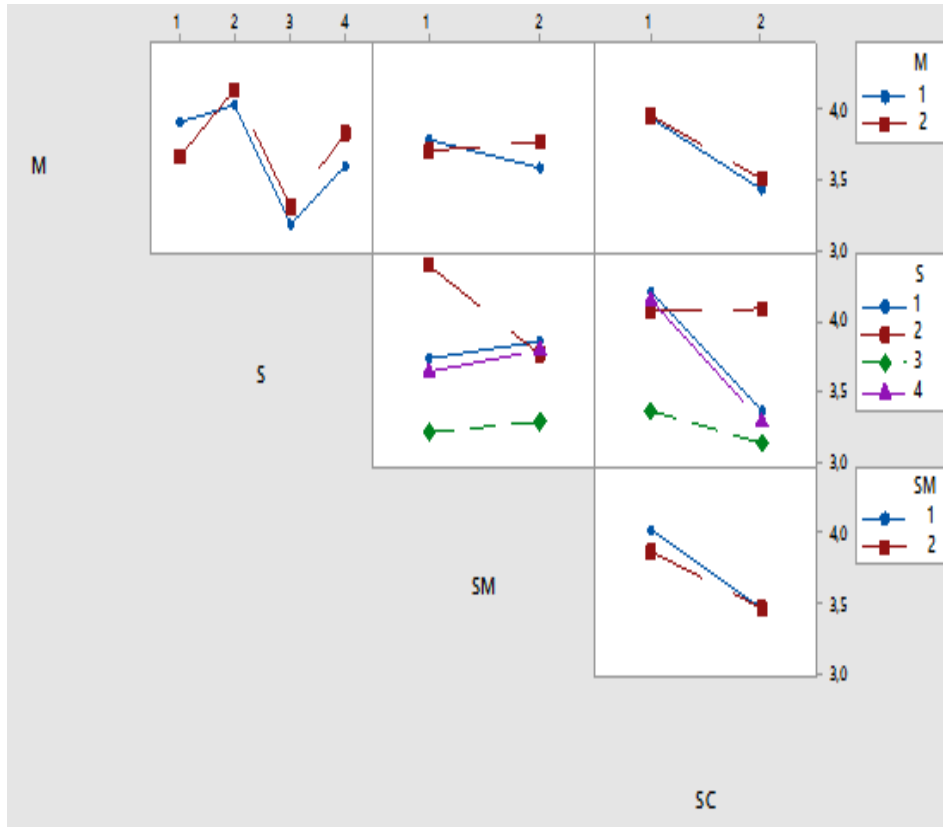
A análise de variância foi adotada para os parâmetros utilizados em cada ensaio.

#### 5.2.1. Fresamento tangencial concordante e discordante para $V_f = 5$ m/min

A análise de variância para a  $V_f$  de 5 m/min, no fresamento tangencial com profundidade de corte de  $a_p = 1,0$  mm que resultaram em valores de P-Value  $< 5\%$ , foram: significativo entre as diferentes velocidades de corte utilizadas que correspondem as rotações de 7000, 9000, 13000 e 16000 rpm, para P-Value 0,011, indicando ser menor que 5%; assim como o sentido de corte (SC), concordante e discordante que também apresentou resultado significativo P-Value 0,007 e quando verificado as interações entre as duas espécies, as velocidades de corte e o sentido de corte (SC) concordante e discordante ocorreu significância abaixo de 5% com P-Value 0,037.

Observam-se em Figura 37 e Quadro 5 todas as interações de rugosidade e parâmetros de corte, a relação da  $V_f = 5$  m/min e as  $V_c$ , no qual nota-se que o valor da  $R_a$  tende a diminuir com a  $V_c$  (3) 10,9 m/s. A relação do sentido de corte concordante (1) e discordante (2) com a  $V_c$  mostra o comportamento, evidenciando o sentido de corte discordante (2) como resultado mais satisfatório por apresentar valores de  $R_a$  menores. Na velocidade de corte de 10,9 m/s (S3), no sentido de corte discordante (2) ocorre a menor tendência dos valores de  $R_a$ . No sentido de medição (SM) a favor (1) e contra (2) os valores médios da rugosidade menores, são encontrados para a madeira de *citriodora* (1) no sentido de medição contra (2) e  $V_c$  de 10,9 m/s (3) e menores valores de  $R_a$  para o sentido de corte discordante (2).

Figura 37 – Interação para  $R_a$  em função da madeira (M), rotação (S), sentido de medição (SM) e Sentido de corte (SC).



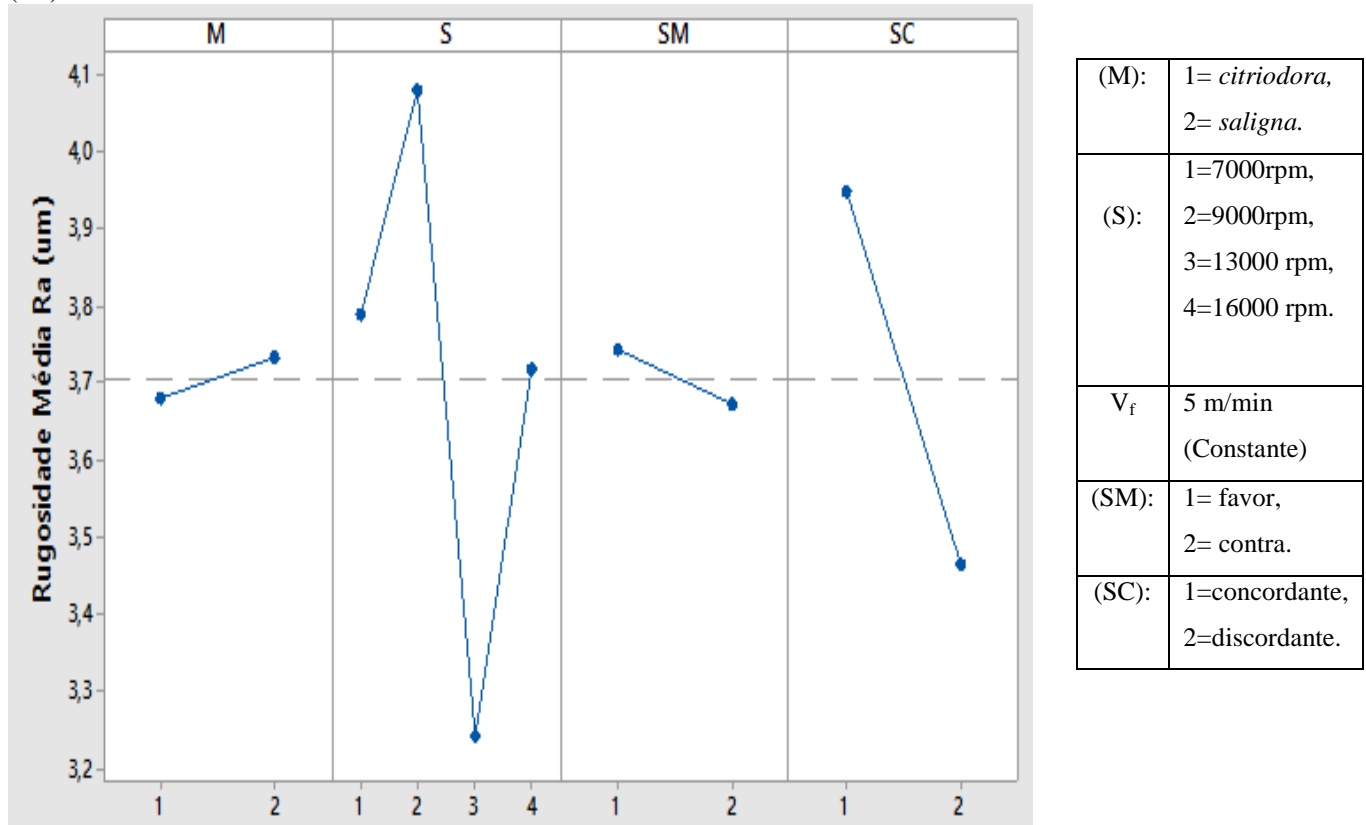
Quadro 5 - Parâmetros calculados no Minitab para  $R_a$ , com a denominação numeral.

(M):	1= <i>citriodora</i> , 2= <i>saligna</i> .
(S):	1=7000rpm, 2=9000rpm, 3=13000 rpm, 4=16000 rpm.
$V_f$ :	5 m/min (Constante)
(SM):	1=favor, 2=contra.
(SC):	1=concordante, 2=discordante.

Fonte: O Autor.

Através dos resultados obtidos nesta análise estatística observa-se que o melhor acabamento, ou seja, a menor rugosidade  $R_a$  no ensaio de fresamento tangencial está relacionada a uma  $V_c = 10,9$  m/s (3), quando mantido a  $V_f = 5$  m/min, no sentido de corte discordante (2), para a madeira *citriodora* (1) e sentido de medição contra (2) em Figura 38.

Figura 38 – Efeitos de  $R_a$  em função da Madeira (M), Rotação (S), Sentido de medição (SM), e Sentido de Corte (SC).



Fonte: Autor.

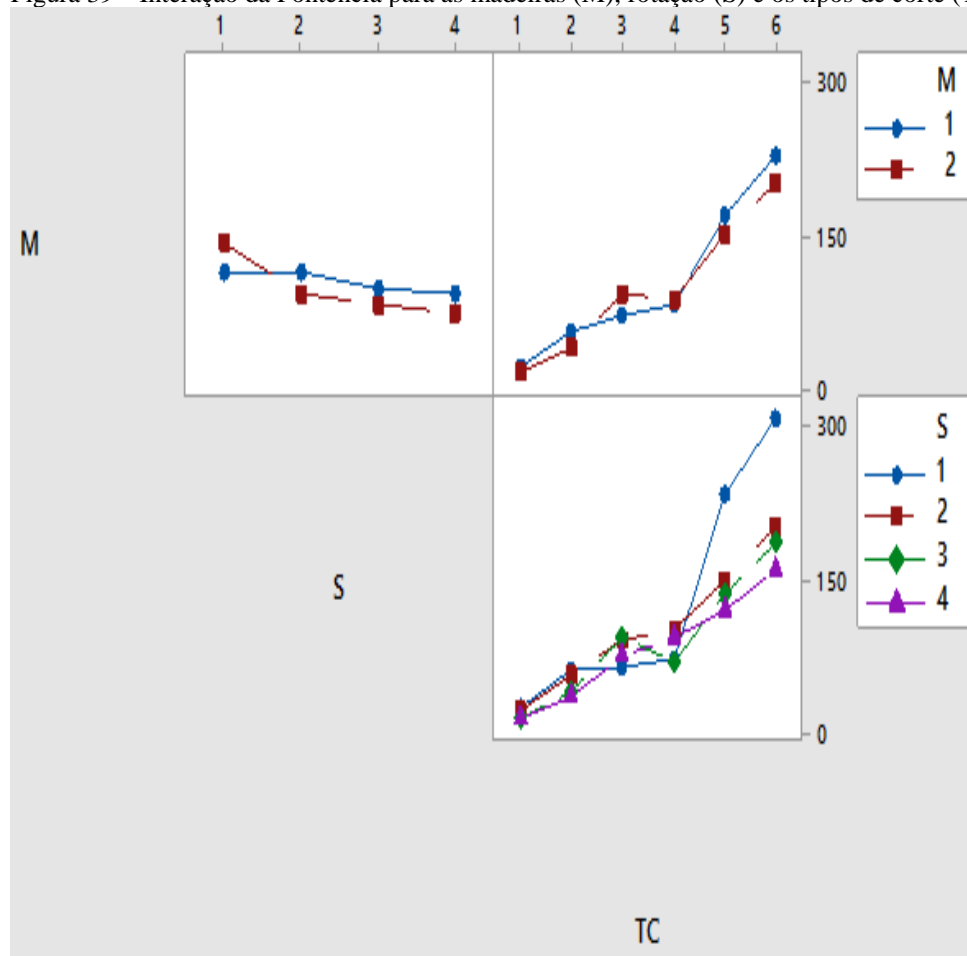
Os resultados obtidos e verificados na Figura 38, estão de acordo com Goli et al. (2002); estes autores ainda afirmam que os resultados demonstram que o corte no sentido discordante promoveu um melhor acabamento de usinagem para madeira.

### 5.2.2. Análise de Potência Consumida para $V_f = 5$ m/min no fresamento tangencial concordante e discordante

A análise de variância para a potência consumida quando  $V_f = 5$  m/min, no fresamento tangencial concordante e discordante com profundidade de corte de 1 mm, resultou em todos os valores de P-Value < 5% sendo significativo entre as madeiras, entre as velocidade de corte e avanço e entre os tipos de corte adotados. Os parâmetros calculados no Minitab para a potência com sua denominação numeral estão indicados no Quadro 6.

Todos os valores foram significativos, abaixo de 5% (  $P - Value = 0$  ) estão discutidos para todos os casos, quais sejam: entres as madeiras,  $V_c$  e tipos de corte menor que 5%;  $V_c$  ou rotações comparado com os tipos de corte (TC): 1 = Tan Dis (tangencial discordante), 2 = Tan Conc (tangencial concordante), 3 = Tang Bord Conc (tangencial da borda concordante), 4=Tan Bord Dis (tangencial da borda discordante), 5 = Front Perp (frontal perpendicular às fibras) e 6 = Fron Paral (frontal paralelo às fibras). Na Figura 39 é possível observar todas as interações da potência consumida e os parâmetros de corte.

Figura 39 – Interação da Pontência para as madeiras (M), rotação (S) e os tipos de corte (TC).



Quadro 6 - Parâmetros calculados no Minitab para potência, com a denominação numeral.

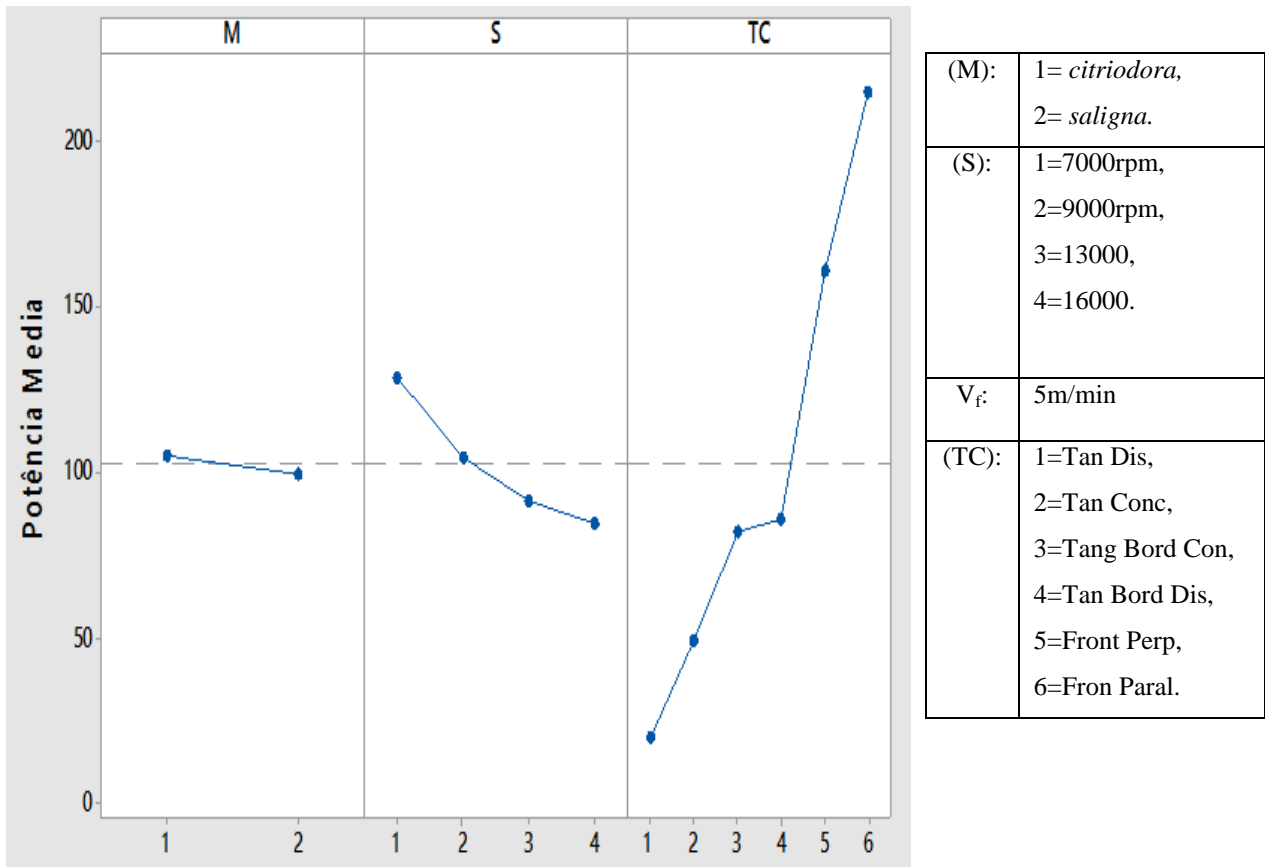
(M):	1= <i>citriodora</i> , 2= <i>saligna</i> .
(S):	1=7000rpm, 2=9000rpm, 3=13000, 4=16000.
$V_f$ :	5m/min
(TC):	1=Tan Dis, 2=Tan Conc, 3=Tang Bord Con, 4=Tan Bord Dis, 5=Front Perp, 6=Fron Paral.

Fonte: Autor.

Em Figura 39 a relação da  $V_c$  e os tipos de corte de 6 a 1 percebe-se claramente que a potência consumida diminui, seguindo a seguinte tendência: aumenta-se a  $V_c$  (ou rotações) têm-se os menores valores de potência consumida, assim como para os tipos de corte de 6 a 1.

Observam-se na Figura 40 os principais efeitos para a potência em função da madeira e os parâmetros utilizados.

Figura 40 - Principais efeitos para a Potência em função da madeira (M), rotação (S) e tipo de corte (TC).



Fonte: Autor.

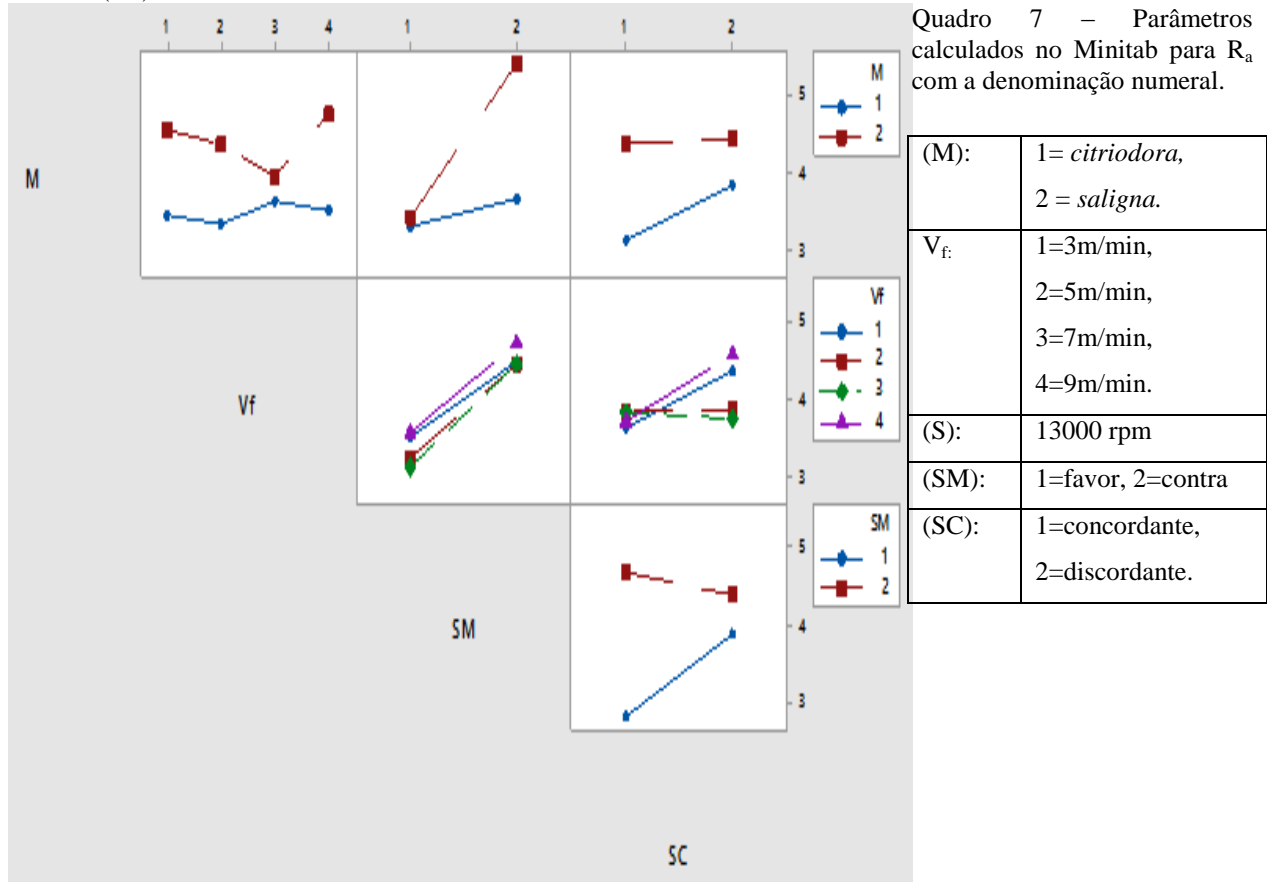
Em Figura 40, para a madeira (2) *saligna* a média da potência foi ligeiramente menor; com diminuição gradativa da potência quando a rotação (S) aumenta, ou seja, aumentando a  $V_c$  obteve-se menores valores de potência média consumida e com relação ao tipo de corte (TC) a potência diminui de 1 para o 6 ou seja, nesta sequência apresenta-se os menores valores de potência média consumida nos tipos de corte (TC).

### 5.2.3. Análise da qualidade superficial para $V_c = 10,9$ m/s no fresamento tangencial concordante e discordante

Os parâmetros calculados no Minitab para  $R_a$  com sua denominação numeral estão indicados no Quadro 7. Na Figura 41 observam-se todas as interações de  $R_a$  e parâmetros de corte no caso em que se manteve a rotação em 13000 rpm que corresponde a  $V_c = 10,9$  m/s e variou-se

as  $V_f$  em 3, 5, 7, e 9 m/min no fresamento tangencial cilíndrico concordante e discordante e nos sentidos de medição a favor e contra.

Figura 41 – Interações para  $R_a$  entre as madeiras (M), velocidade de avanço ( $V_f$ ), sentido de medição (SM) e sentido de corte (SC).

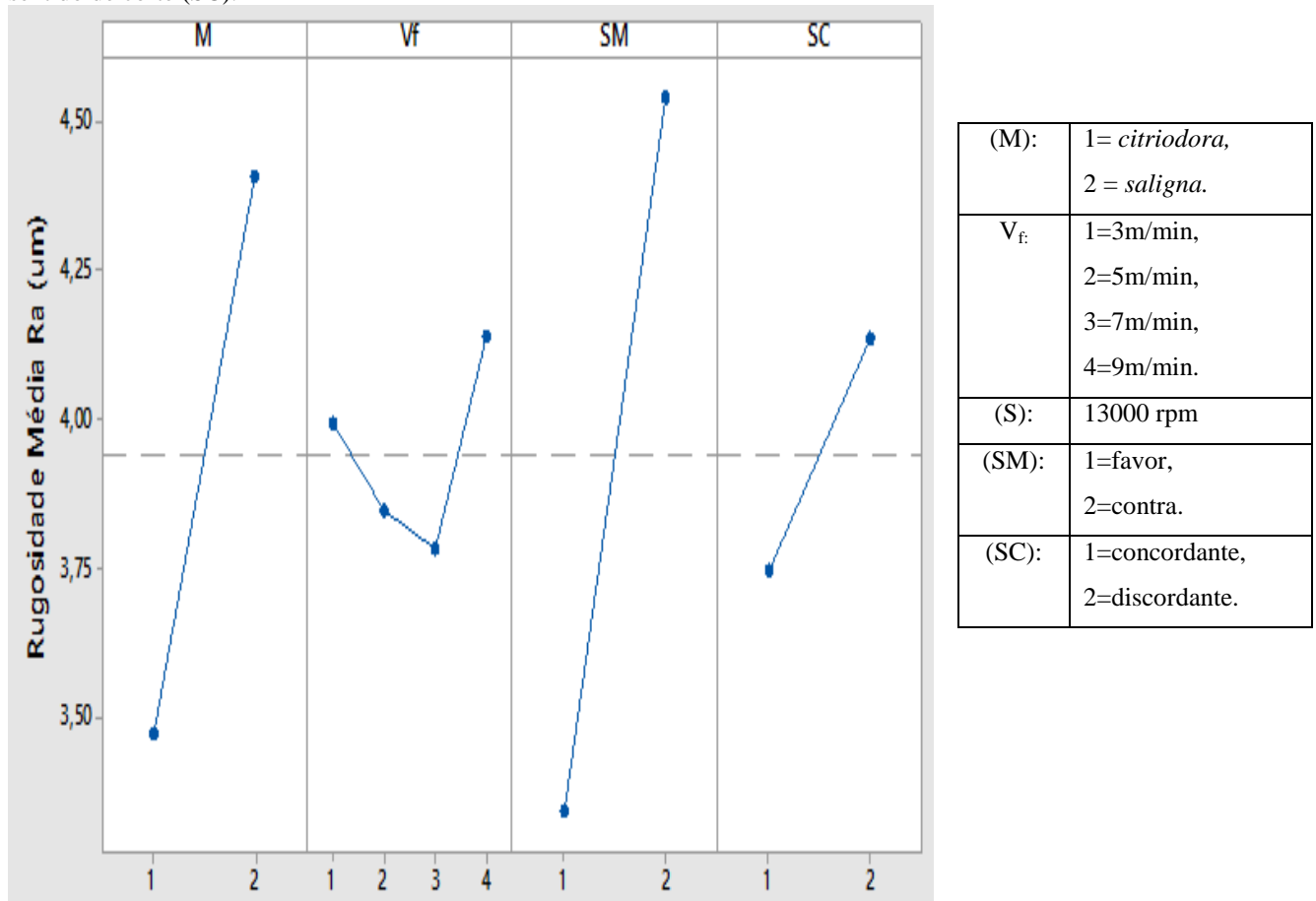


Fonte: Autor.

Em Figura 41, nota-se que os menores valores de  $R_a$  está sendo para a madeira *citriodora* (1) com relação as  $V_f$  (1) e (2) que correspondem as  $V_f = 3$  e  $5$  m/min, que são as menores utilizadas. Os resultados alcançados neste trabalho estão compatíveis com Wrublack et al. (2008) e Tibúrcio (2009) relatam que o aumento da  $V_f$  prejudica o acabamento superficial; assim, no fresamento com baixa  $V_f$  resulta em menores rugosidades.

Pode-se observar na Figura 42 todas as interações de  $R_a$  e os parâmetros de corte.

Figura 42 – Efeitos para  $R_a$  em função da madeira (M), velocidade de avanço ( $V_f$ ), sentido de medição (SM) e sentido de corte (SC).



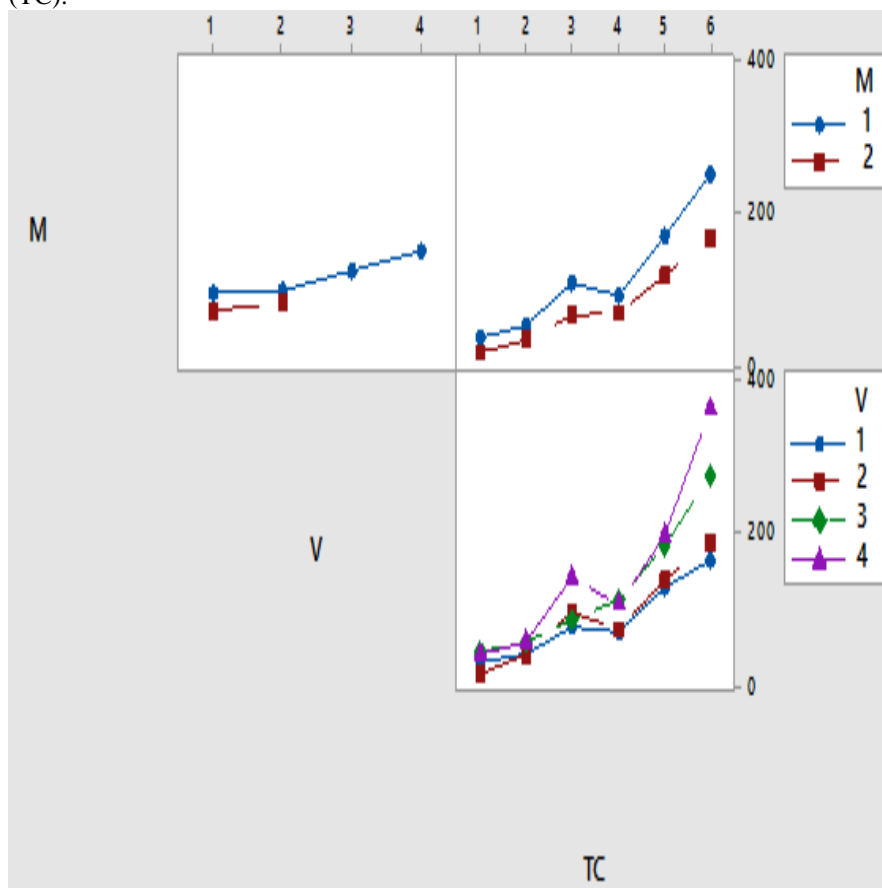
Fonte: Autor.

A relação do sentido de medição (SM) com as  $V_f$  mostra o comportamento, evidenciando o sentido de medição (1) favor como resultado mais satisfatório por apresentar valores médios de  $R_a$  menores. Entre as madeiras e o sentido de corte (SC) a madeira (1) *citriodora* apresenta menores valores médios de  $R_a$ , para  $V_f$  (2) e (3), respectivamente 5 e 7 m/min. No sentido de medição a favor (1) os menores valores médios de  $R_a$  são encontrados para o sentido de corte (SC) quando medido a favor (1). Os menores valores de  $R_a$  obtidos forma para a madeira *citriodora* (1), na  $V_f$  igual a (3) que equivale a 7 m/min sendo os menores valores de  $R_a$  para as menores  $V_f$ , no sentido de medição (SM) (1) a favor e sentido de corte (SC) (1) concordante, como pode-se observar na Figura 42 e aumentando consideravelmente o valor médio de  $R_a$  quando a  $V_f$  é máxima em 9 m/min.

### 5.2.4. Análise da Potência para $V_c = 10,9$ m/s no fresamento tangencial concordante e discordante

Na Figura 43 e Quadro 8, observam-se todas as interações da potência e parâmetros de corte no caso em que se manteve a rotação em 13000 rpm que corresponde a  $V_c = 10,9$  m/s e variou-se as  $V_f$  em 3, 5, 7, e 9 m/min no fresamento cilíndrico tangencial concordante e discordante e nos sentidos de medição a favor e contra.

Figura 43 – Interação para rugosidade média  $R_a$  entre as madeiras (M), velocidade de avanço ( $V_f$ ) e tipo de corte (TC).



Quadro 8 - Parâmetros calculados no Minitab para potência, com a denominação numeral.

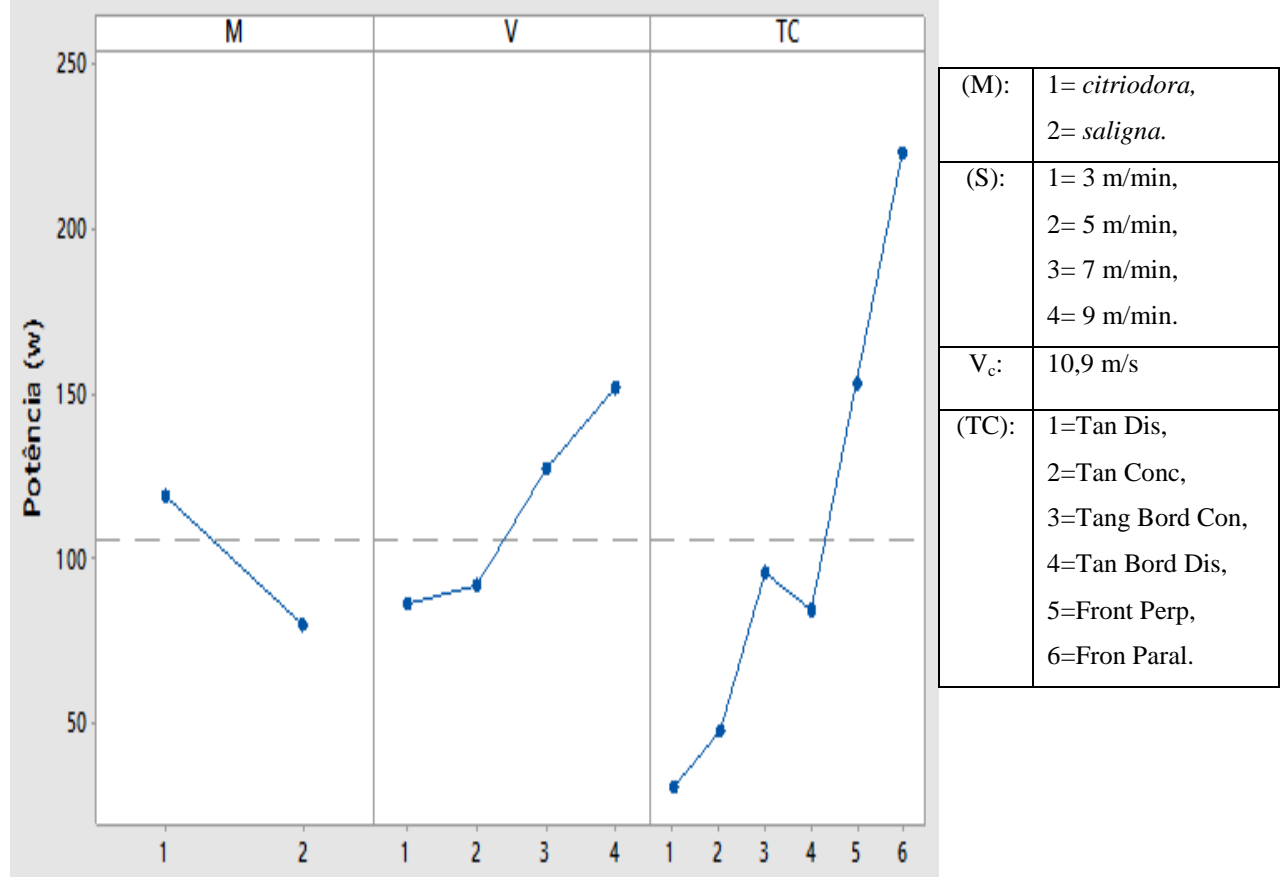
(M):	1= <i>citriodora</i> , 2= <i>saligna</i> .
(S):	1= 3 m/min, 2= 5 m/min, 3= 7 m/min, 4= 9 m/min.
$V_c$ :	10,9 m/s
(TC):	1= Tan Dis, 2= Tan Conc, 3= Tang Bord Con, 4= Tan Bord Dis, 5= Front Perp, 6= Fron Paral.

Fonte: Autor.

Nota-se na Figura 43 que o menor valor da potência média consumida está sendo ligeiramente para a madeira *saligna* (1) com relação às  $V_f$  para as duas espécies ocorre a diminuição de  $R_a$  com a diminuição da  $V_f$ . Entre as madeiras e o tipo de corte (TC) apresenta menores valores médios de potência seguindo o seguinte padrão do tipo de corte de 1 a 6.

Pode-se observar na Figura 44 todas as interações da potência média consumida e os parâmetros de corte.

Figura 44 - Efeitos para a potência em função da madeira (M), velocidade de avanço ( $V_f$ ) e tipo de corte (TC).



Fonte: Autor.

Na Figura 44 observamos que a madeira que obteve menores valores médios para a potência consumida foi para a espécie de *Eucalyptus saligna* (2). Conforme houve diminuição das velocidades de avanço ocorreu diminuição da potência consumida. No tipo de corte (TC) apresenta menores valores médios de potência seguindo o seguinte padrão, de 1 e aumentando até 6 com uma inversão entre os (TC) de 3 e 4.

### 5.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DO EFEITO DA $V_f$

#### 5.3.1. Fresamento Fpa e Fpp às fibras para $V_c = 10,9$ m/s

Na Tabela 2 podem ser observados os valores registrados de  $R_a$  no Fpa e Fpp às fibras da madeira indicando seus desvios padrão e o teste de Tukey, os ensaios tiveram  $a_p = 5$  mm.

Tabela 2 – Média de  $R_a$  para a madeira *citriodora* e *saligna* no Fpa e Fpp às fibras, para  $V_c = 10,9$  m/s.

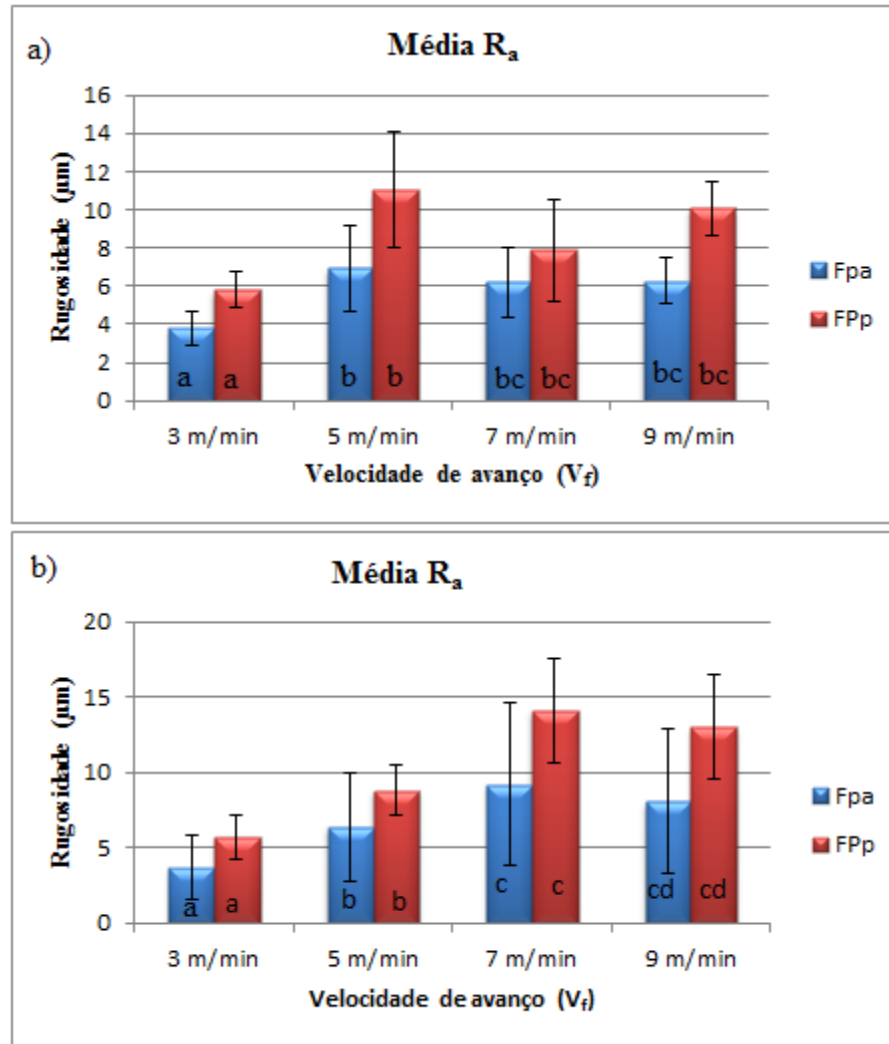
Parâmetros			$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	
$V_c = 10,9$ (m/s)	$V_f$ (m/min)	*Tukey	Paralelo Dp.	Perpendicular Dp.
<i>Citriodora</i>				
	3	a	3,80 0,87	5,80 0,92
	5	b	6,93 2,24	11,03 3,04
	7	bc	6,20 1,88	7,90 2,65
	9	bc	6,27 1,20	10,10 1,41
<i>Saligna</i>				
	3	a	3,67 0,99	5,73 0,76
	5	b	6,40 1,53	8,83 2,70
	7	c	9,23 3,06	14,13 2,50
	9	cd	8,10 0,83	13,00 2,60

Fonte: Autor (\*Tukey - letras diferentes indicam diferença significativa menor 5% ( $p < 5\%$ )).

Para a espécie *citriodora*: os valores registrados de  $R_a$  (Apêndice A), a melhor qualidade superficial registrada foi para  $R_a$  de  $2,8 \mu\text{m}$  ocorreu no movimento de corte paralelo às fibras,  $V_f = 3$  m/min, o maior valor de  $R_a = 14,4 \mu\text{m}$ ; ou seja, a pior qualidade superficial ocorreu para o movimento de corte perpendicular às fibras e  $V_f = 5$  m/min. Para a espécie *saligna*: a melhor qualidade superficial registrada (Apêndice A) foi para  $R_a$  de  $2,2 \mu\text{m}$  ocorreu no movimento de corte paralelo às fibras na  $V_f = 3$  m/min, e o maior valor de  $R_a = 17,6 \mu\text{m}$ ; que ocorreu no movimento de corte perpendicular às fibras com  $V_f = 9$  m/min.

Os gráficos formados a partir dos valores referentes à Tabela 2 estão ilustrados nos gráficos da Figura 45.

Figura 45 – Média de  $R_a$  para Fpa e Fpp às fibras, a) *citriodora*, b) *saligna*) para  $V_c = 10,9$  m/s.



Fonte: Autor.

Na Figura 45 verificam-se para as duas espécies de madeira pesquisadas que os maiores valores de  $R_a$  foram medidos para o corte perpendicular, isto ocorre pelo fato que durante a medição, a haste do rugosímetro percorre as fibras da madeira a  $90^\circ$ , isto proporcionou maiores diferenças entre os picos e vales; portanto, maiores valores de  $R_a$ , quando comparados com as medidas realizadas no corte paralelo às fibras da madeira. Também a tendência do aumento de  $R_a$  com o aumento da  $V_f$  e melhores resultados ocorreram para a  $V_f$  igual a 3 m/min no fresamento Fpa às fibras da madeira para as duas espécies de madeira.

### 5.3.2. Potência consumida no fresamento Fpa e Fpp às fibras

Na Tabela 3 podem ser observados os valores registrados de  $R_a$  no Fpa e Fpp às fibras da madeira indicando seus desvios padrão e o teste de Tukey, os ensaios tiveram  $a_p = 5$  mm.

Tabela 3 - Potência consumida no Fpa e Fpp às fibras para  $V_c = 10,9$  m/s.

$V_f$ (m/min)	*Tukey	Fpa	Fpp	Dp Fpa	Dp Fpp
<i>citriodora</i>					
3	a	176,16	139,50	3,79	4,92
5	a	192,81	154,69	4,15	19,34
7	a	273,44	185,39	5,43	32,30
9	b	361,38	198,22	8,05	36,24
<i>saligna</i>					
3	a	150,74	120,36	7,56	6,48
5	a	183,17	120,80	6,70	20,51

Fonte: Autor (\*Tukey - letras diferentes indicam diferença significativa menor 5% ( $p < 5\%$ )).

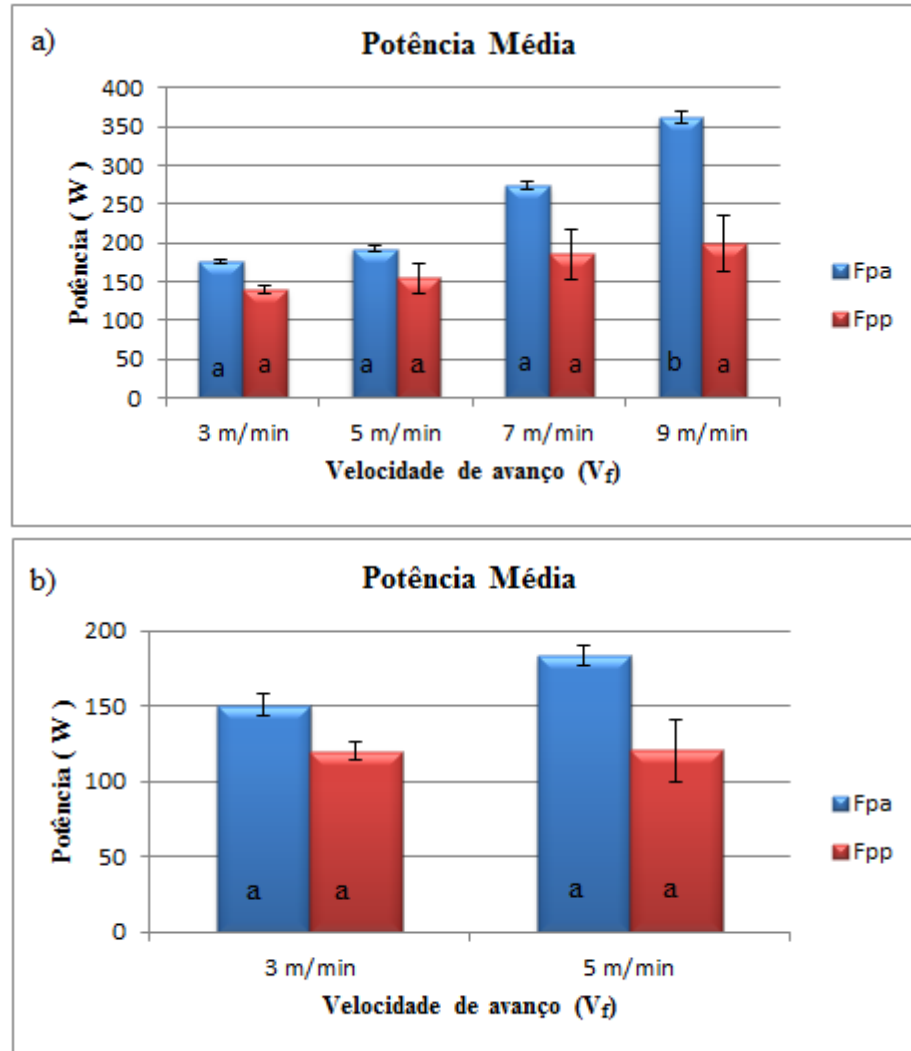
O comportamento da potência consumida em cada velocidade de avanço para a velocidade de corte 10,9 m/s. Na Tabela 3 observa-se que houve diferença significativa para a espécie *citriodora* para a velocidade de avanço de 9 m/min. Houve a tendência do aumento da potência média consumida com o aumento da velocidade de avanço. Entre as velocidades de avanço de 3, 5 e 7 m/min não houve diferenças significativas pelo teste de Tukey.

Para a espécie *saligna* não houve diferenças significativas pelo teste de Tukey, e a menor potência consumida ocorreu para a velocidade de avanço de 3 m/min.

Souza et al. (2011) ao investigar o consumo de potência na usinagem de *Eucalyptus sp* observou que menores valores de  $V_f$  implicam em baixos consumos de potência.

Na Figura 46 os gráficos referentes aos dados da Tabela 3, para o fresamento Fpa e Fpp.

Figura 46 - Potência consumida no Fpa e Fpp, a) *citriodora*, b) *saligna*, para  $V_c = 10,9$  m/s.



Fonte: Autor.

Para a espécie *citriodora* observa-se que com o aumento da  $V_f$  ocorre o aumento da potência, sendo os maiores valores médios registrados para o Fpa. O maior valor de potência ocorreu para  $V_f = 9$  m/min para *citriodora* e indicou haver diferença significativa com relação as outras  $V_f$  de 3, 5 e 7 m/min e não houve variação significativa no teste de Tukey entre estas  $V_f$ . Hipótese é que com a diminuição da velocidade de avanço diminui a velocidade de translação da ferramenta sobre a peça, aumentando o consumo de potência. Para a espécie *saligna* o menor valor registrado ocorreu para a  $V_f$  de 3 m/min no Fpa, não ocorreu diferença significativa entre a  $V_f$  de 5 m/min.

### 5.3.3. Fresamento TCF, TCC, TDF e TDC

Para as espécies *citriodora* e *saligna*, os valores de  $R_a$  no fresamento tangencial no sentido concordante e discordante medidos contra (C) e a favor (F), para os ensaios manteve-se  $V_c$  10,9 m/s com a variação do parâmetro de  $V_f$  de 3, 5, 7, 9 m/min e  $a_p = 1,0$  mm; indicando seus desvios padrão e o teste de Tukey na Tabela 4.

Tabela 4 – Média de  $R_a$ , *citriodora* e *saligna* no fresamento TCF, TCC, TDF e TDC; para  $V_c = 10,9$  m/s.

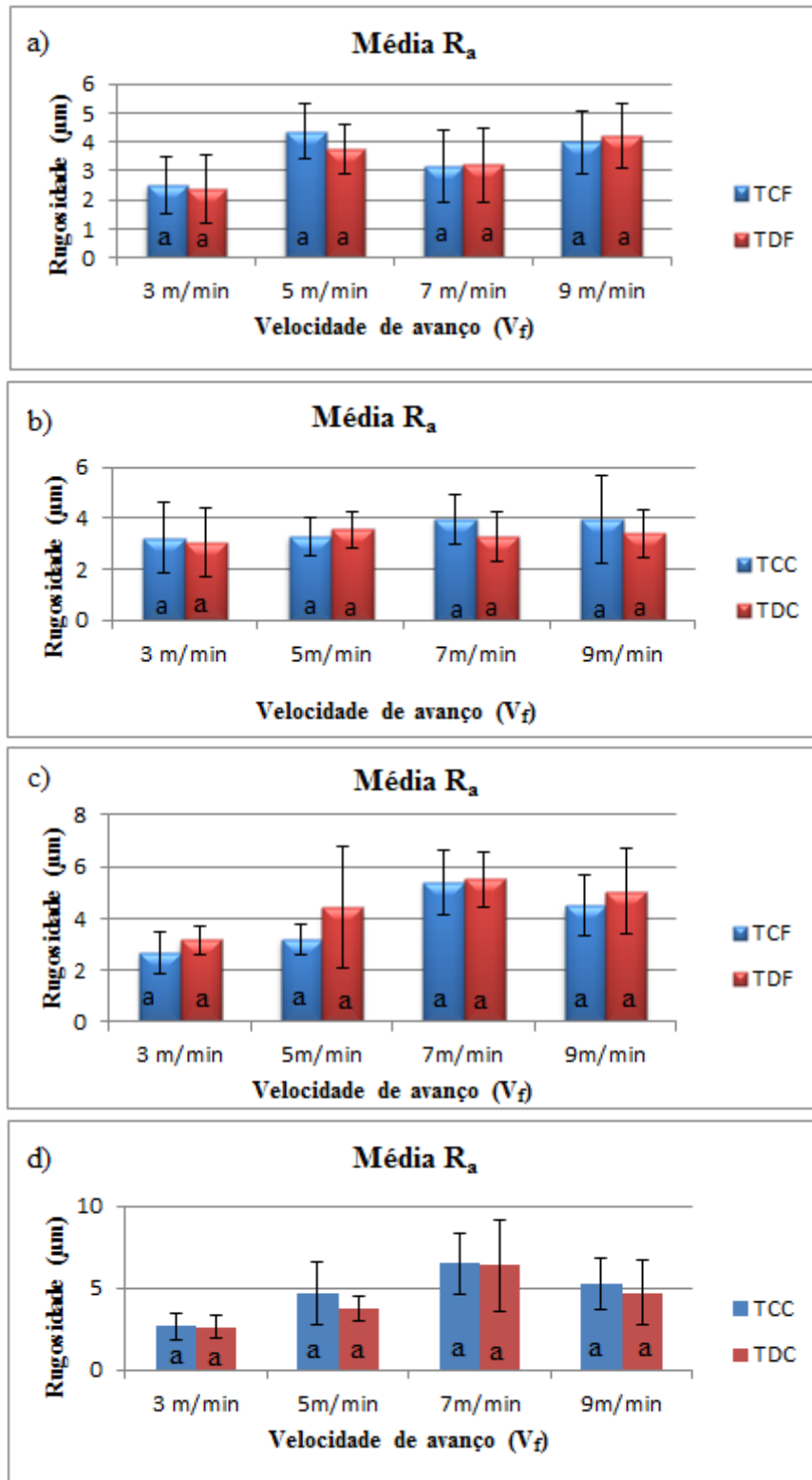
Parâmetros			$R_a$ Concordante ( $\mu\text{m}$ )		$R_a$ Discordante ( $\mu\text{m}$ )	
$V_c = 10,9$ (m/s)	$V_f$ (m/min)	*Tukey	F Dp.	C Dp.	F Dp.	C Dp.
<i>Citriodora</i>						
	3	a	2,50 1,41	3,23 0,98	2,37 1,20	3,03 1,34
	5	a	4,37 0,75	3,30 0,97	3,77 0,86	3,57 0,71
	7	a	3,13 0,98	3,97 1,25	3,20 1,30	3,30 0,97
	9	a	4,00 1,72	3,97 1,10	4,23 1,11	3,40 0,93
<i>Saligna</i>						
	3	a	2,67 0,81	2,67 0,81	3,17 0,57	2,63 0,66
	5	a	3,20 0,57	4,67 1,96	4,43 2,36	3,7 0,76
	7	a	5,40 1,25	6,50 1,85	5,53 1,06	6,40 2,80
	9	a	4,50 1,19	5,27 1,61	5,03 1,66	4,73 1,99

Fonte: Autor. (\*Tukey - letras diferentes indicam diferença significativa menor 5% ( $p < 5\%$ )).

Na Tabela 4, podemos observar os valores médios de  $R_a$  para a espécie *citriodora* e *saligna*. Os resultados obtidos (Apêndice B) demonstram que: para a espécie *citriodora* a melhor qualidade superficial registrada foi para  $R_a$  de 1,2  $\mu\text{m}$  ocorreu no TDF na  $V_f$  de 3 m/min, e o maior valor de  $R_a$  de 7,2  $\mu\text{m}$ ; ou seja, a pior qualidade superficial medido para o TCC com  $V_f$  de 9 m/min. Para a espécie *saligna* a melhor qualidade superficial registrada foi para  $R_a$  de 1,6  $\mu\text{m}$  ocorreu no TCF na  $V_f$  de 3 m/min, e o maior valor de  $R_a$  de 10,8  $\mu\text{m}$ ; ou seja, a pior qualidade superficial ocorreu para o TDC, que é o medido com  $V_f$  de 7 m/min.

Os dados da Tabela 4 estão mostrados na Figura 47.

Figura 47 - Média de  $R_a$  nos fresamentos TCF, TDF, TDC e TCC; a), b) *citriodora* e c), d) *saligna* ;  $V_c=10,9$  m/s.



Fonte: Autor.

### 5.3.4. Fresamento tangencial concordante, discordante e das bordas perpendicular às fibras

Na Tabela 5, poderemos observar os valores médios de  $R_a$  para a espécie *citriodora* e *saligna* no fresamento concordante e discordante, para  $V_c = 10,9$  m/s e  $a_p = 1,0$  mm. A variação do parâmetro de  $V_f$  de 3, 5, 7, 9 m/min; indicando os desvios padrão (Dp) e o teste de Tukey.

Tabela 5 – Valores de  $R_a$  para a madeira *citriodora* e *saligna* no fresamento concordante, discordante e das bordas, para  $V_c = 10,9$  m/s.

Parâmetros			Média $R_a$	
$V_c=10,9$ (m/s)	$V_f$ (m/min)	*Tukey	Concordante ( $\mu\text{m}$ ) Dp	Discordante ( $\mu\text{m}$ ) Dp
<i>Citriodora</i>				
	3	a	4,47 0,83	6,07 0,42
	5	a	5,60 1,25	6,07 0,99
	7	a	4,40 0,53	3,93 1,72
	9	b	13,33 0,83	5,33 1,33
<i>Saligna</i>				
	3	a	2,67 0,42	3,87 0,46
	5	b	4,73 0,81	7,33 1,01
	7	ab	4,87 0,83	4,80 1,73
	9	b	6,93 1,68	5,60 1,51

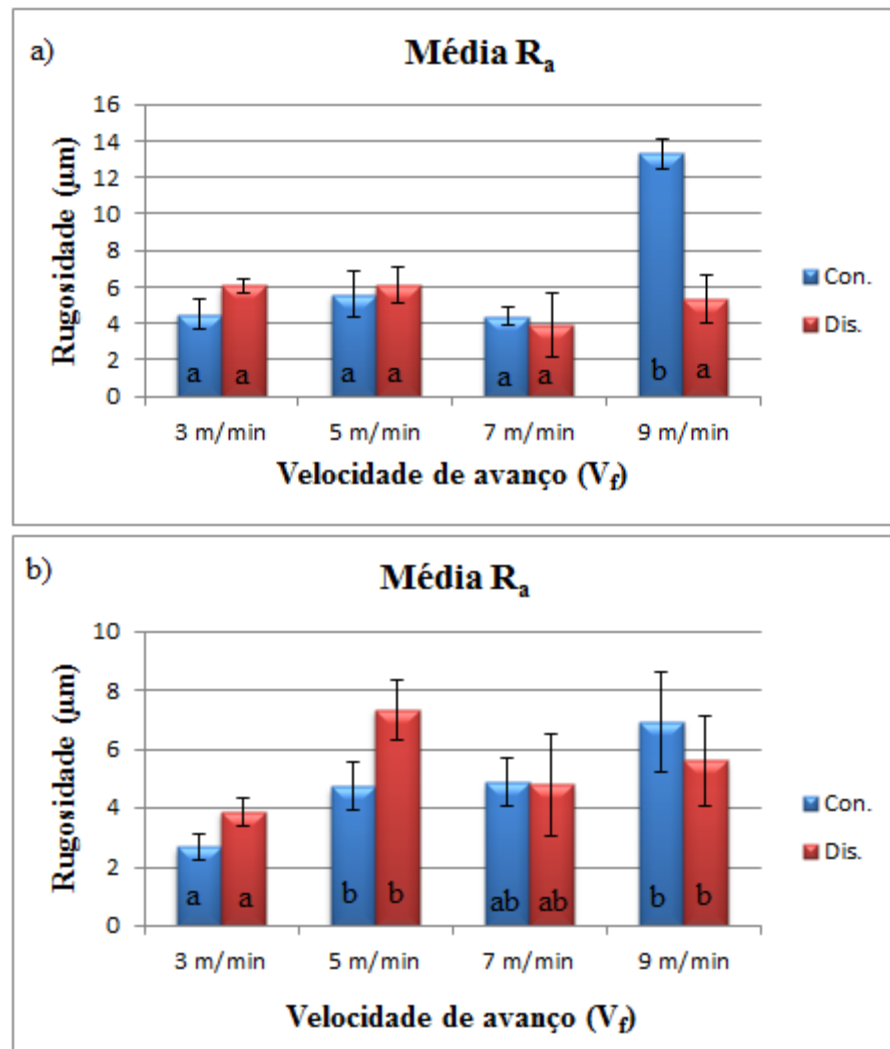
Fonte: Autor. (\*Tukey - letras diferentes indicam diferença significativa menor 5% ( $p < 5\%$ )).

Para a espécie *citriodora* a melhor qualidade superficial registrada (Apêndice C), foi para  $R_a$  de  $2,4 \mu\text{m}$  ocorreu no movimento de corte discordante,  $V_f = 7$  m/min, o maior valor de  $R_a = 14,0 \mu\text{m}$ ; ou seja, a pior qualidade superficial ocorreu para o movimento de corte concordante e  $V_f = 9$  m/min.

Para a espécie *saligna* a melhor qualidade superficial registrada foi para  $R_a$  de  $2,2 \mu\text{m}$  ocorreu no movimento de corte concordante na  $V_f = 3$  m/min e o maior valor de  $R_a = 8,4 \mu\text{m}$ ; sendo a pior qualidade superficial que ocorreu para o movimento de corte discordante com  $V_f = 5$  m/min.

Os gráficos formados a partir dos valores da Tabela 5 em Figura 48 para o ensaio de fresamento das bordas concordante (Con.) e discordante (Dis.), para  $V_c = 10,9$  m/s,  $a_p = 1,0$  mm, para as duas espécies.

Figura 48 – Média de  $R_a$  no fresamento tangencial (Con.) e (Dis.), a) *citriodora* e b) *saligna*.



Fonte: Autor.

Na Figura 48 verificam-se para as duas espécies de madeira pesquisadas que houve a tendência do aumento de  $R_a$  com o aumento da  $V_f$  e melhores resultados ocorreram para a  $V_f$  igual a 3 m/min no fresamento concordante para a espécie *saligna*.

### 5.3.5. Potência consumida no fresamento TC, TD, TBC e TBD

Os dados da potência média consumida no fresamento tangencial concordante TC e discordante TD e da borda concordante TBC e borda discordante TBD, estão na Tabela 6.

Tabela 6 – Potência média consumida no fresamento TC, TD, TBC e TBD para  $V_c$  10,9 m/s.

$V_f$ (m/min)	*Tukey	TC	TD	TBC	TBD
<i>citriodora</i>					
		<b>Dp</b>	<b>Dp</b>	<b>Dp</b>	<b>Dp</b>
3	a	45,87	40,75	96,41	81,51
		7,60	7,912	-	-
5	b	54,05	21,76	111,31	66,61
		13,92	12,12	-	-
7	a	58,57	45,43	86,77	113,06
		10,51	7,171	-	-
9	a	58,28	41,05	142,86	107,80
		15,53	7,69	-	-
<i>saligna</i>					
3	a	37,98	25,27	58,72 (c)	59,60 (c)
		11,16	8,40		-
5	b	31,11	12,27	78,88 (c)	78,88 (c)
		3,75	8,97	-	-

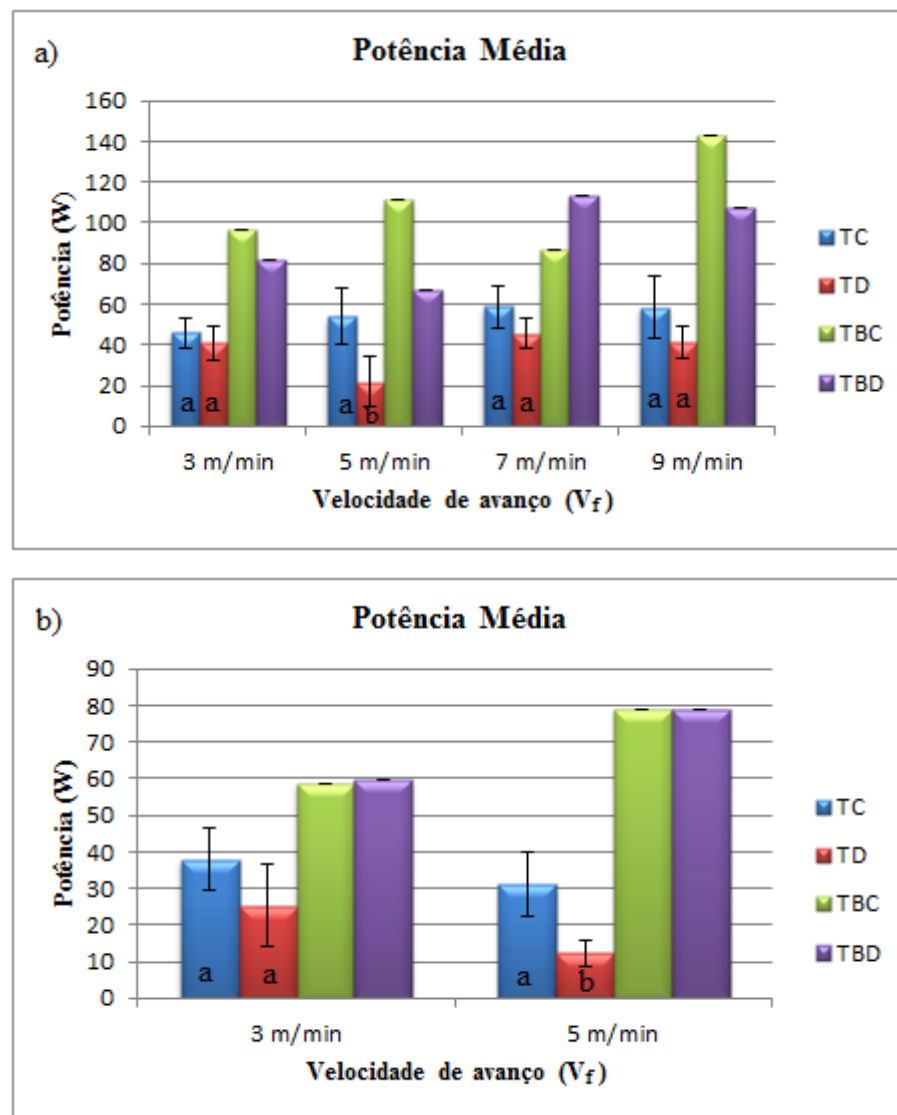
Fonte: Autor. (\*Tukey - letras diferentes indicam diferença significativa menor 5% ( $p < 5\%$ )).

Observa-se a partir da Tabela 6, o menor valor da potência consumida para a espécie *citriodora* foi para o parâmetro de  $V_f$  igual a 5 m/min no fresamento TD, sendo este indicado pelo teste de Tukey como significativo, quando comparado com as  $V_f$  3, 7 e 9 m/min.

Para a espécie *saligna* o menor valor registrado de potência foi para  $V_f$  igual a 5 m/min no fresamento TD, e sendo este também significativo quando comparado com a  $V_f$  de 3 m/min.

Os gráficos formados a partir dos valores da Tabela 6 estão na Figura 49 para  $V_c$  10,9 m/s,  $a_p = 1,0$  mm, para as duas espécies.

Figura 49 - Gráfico da potência consumida no fresamento TC, TD, TBC e TBD para as espécies: a) *citriodora* e b) *saligna*.



Fonte: Autor.

Os resultados obtidos demonstra que a menor potência ocorreu para a velocidade de avanço igual a 5 m/min e no fresamento tangencial concordante (TD), para as duas espécies de madeira havendo diferença significativa pelo teste de Tukey com relação as outras velocidades de avanço e técnicas de fresamento.

## 5.4. EFEITOS DA VARIAÇÃO DA $V_c$

### 5.4.1. Fresamento Frontal paralelo e perpendicular às fibras para $V_f$ 5 m/min

Na Tabela 7, podemos observar os valores médios de  $R_a$  para a espécie *citriodora* e *saligna*, para  $V_f = 5$  m/min no Fpa e Fpp e  $a_p = 5,0$  mm.

Tabela 7 – Média de  $R_a$  para as madeiras *citriodora* e *saligna* no Fpa e Fpp para  $V_f$  5m/min.

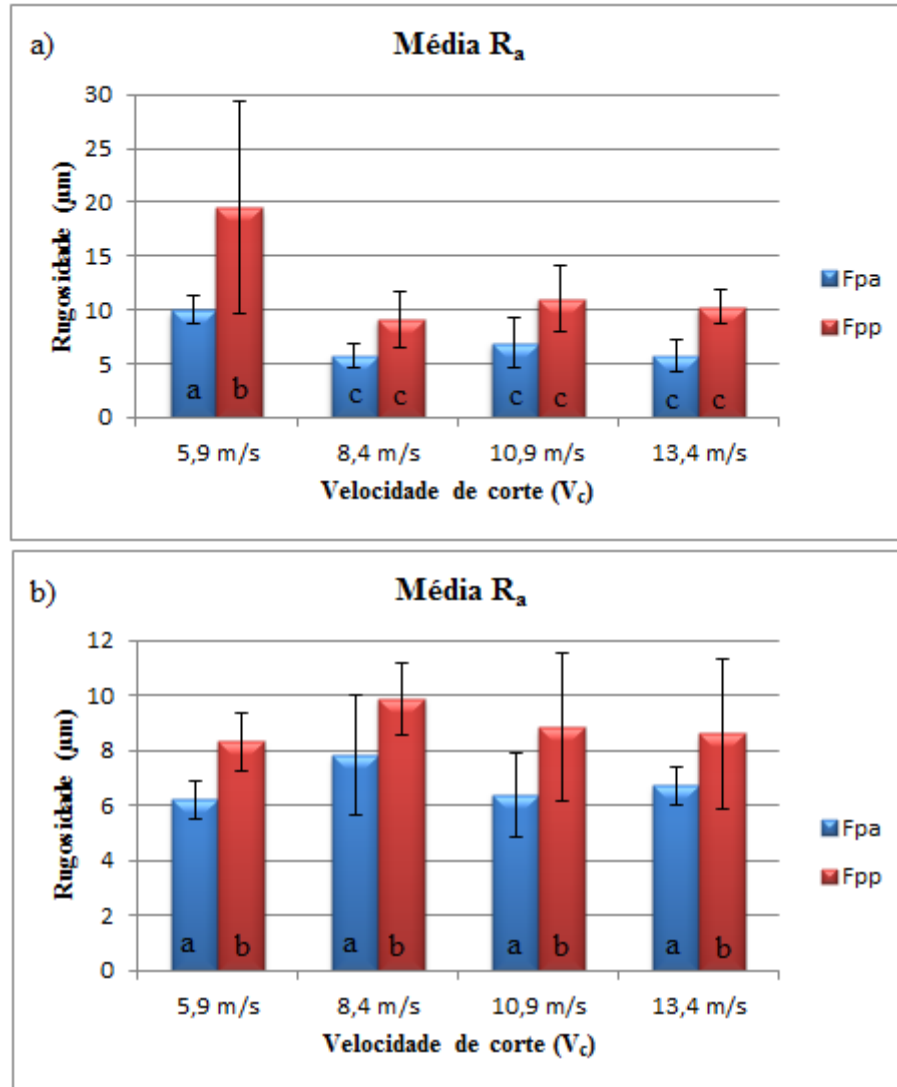
Parâmetros			Média $R_a$	
$V_f = 5$ (m/min)	$V_c$ (m/s)	*Tukey	Paralelo ( $\mu\text{m}$ ) Dp.	Perpendicular ( $\mu\text{m}$ ) Dp.
<i>Citriodora</i>				
	5,9	a	10,00 1,36	19,47 (b) 9,83
	8,4	c	5,70 1,15	9,10 2,66
	10,9	c	6,93 2,24	11,03 3,04
	13,4	c	5,73 1,48	10,23 1,60
<i>Saligna</i>				
	5,9	a	6,20 0,66	8,33 (b) 1,05
	8,4	a	7,83 2,21	9,90 (b) 1,31
	10,9	a	6,40 1,53	8,83 (b) 2,69
	13,4	a	6,73 0,70	8,60 (b) 2,73

Fonte: Autor. (\*Tukey - letras diferentes indicam diferença significativa menor 5% ( $p < 5\%$ )).

Os resultados obtidos demonstram que para a espécie *citriodora* conforme (Apêndice D) a melhor qualidade superficial registrada foi para  $R_a$  de 4,2  $\mu\text{m}$  ocorreu no movimento de corte paralelo às fibras,  $V_c = 8,4$  m/s, o maior valor de  $R_a$  igual 31,2  $\mu\text{m}$ ; ou seja, a pior qualidade superficial ocorreu para o movimento de corte perpendicular e  $V_c$  de 5,9 m/s. Para a espécie *saligna* a melhor qualidade superficial registrada foi para  $R_a$  de 4,4  $\mu\text{m}$  ocorreu no movimento de corte paralelo às fibras na  $V_c = 8,4$  m/s, e o maior valor de  $R_a = 12,8$   $\mu\text{m}$ ; sendo a pior qualidade superficial que ocorreu para o movimento de corte perpendicular às fibras com  $V_c = 10,9$  m/s.

Os gráficos formados a partir dos valores da Tabela 7 estão na Figura 50 para  $V_f = 5$  m/min e  $a_p = 5,0$  mm, para as duas espécies.

Figura 50 - Média de  $R_a$  no fresamento Fpa e Fpp às fibras; a) *citriodora* e b) *saligna* e  $V_f = 5$  m/min.



Fonte: Autor.

Observando-se os gráficos das Figuras 50a), b); se verifica que os melhores valores de  $R_a$  ocorreram para a técnica de corte no fresamento Fpa às fibras da madeira para as duas espécies pesquisadas.

### 5.4.2. Potência consumida no fresamento Fpa e Fpp

Na Tabela 8 podemos observar os dados da potência consumida no Fpa e Fpp às fibras da madeira.

Tabela 8 - Potência consumida no Fpa e Fpp às fibras para  $V_f$  5 m/min.

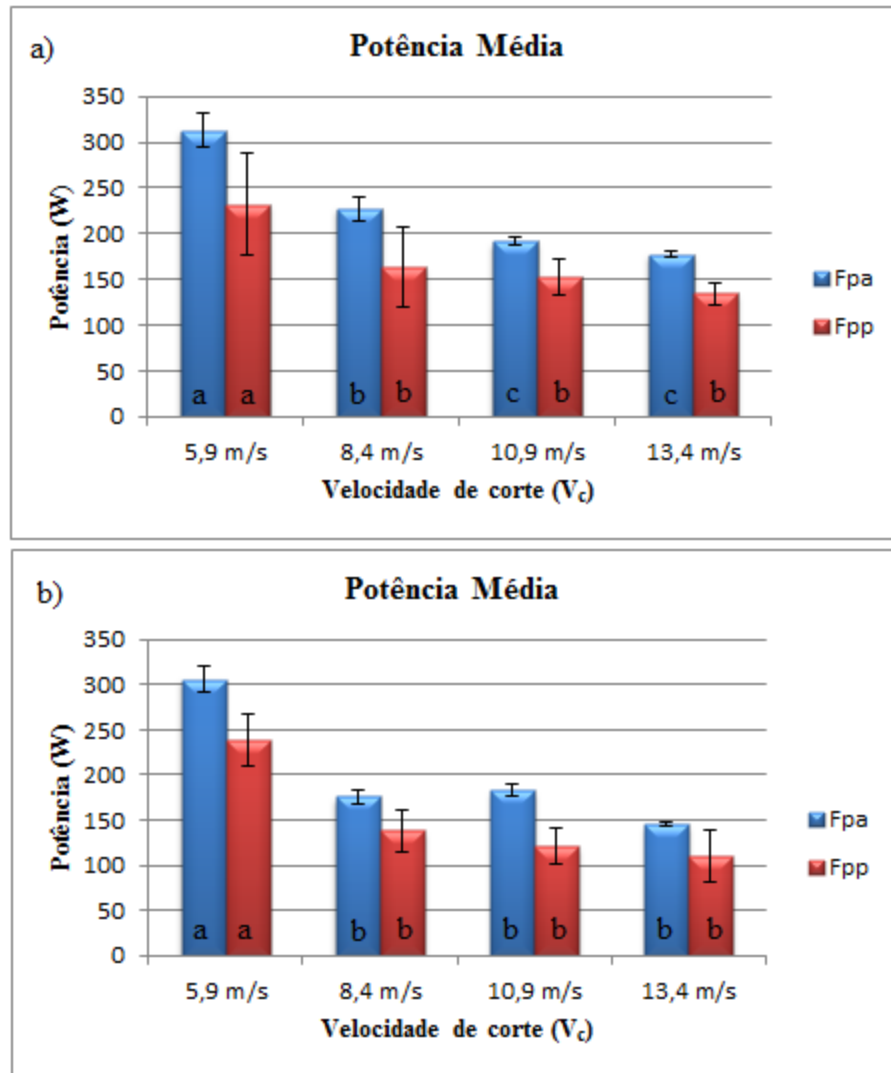
$V_c$ (m/s)	*Tukey		Fpa	Fpp	Dp Fpa	Dp Fpp
<i>citriodora</i>						
5,9	a		313,17	232,25	17,83	56,014
8,4	b		227,87	163,01	13,05	43,21
10,9	c		191,06	152,93 (b)	4,15	19,33
13,4	c		177,33	134,38 (b)	2,75	12,60
<i>saligna</i>						
5,9	a		305,87	238,24	14,64	28,75
8,4	b		175,58	138,18	7,11	22,79
10,9	b		183,17	120,80	6,70	20,51
13,4	b		145,19	109,84	1,97	28,36

Fonte: Autor. (\*Tukey - letras diferentes indicam diferença significativa menor 5% ( $p < 5\%$ )).

Na Tabela 8, podemos observar os valores da potência consumida, sendo o menor valor registrado para a madeira *citriodora* o de 134,38 W, ocorrido na  $V_c$  igual a 13,4 m/s no fresamento Fpp às fibras da madeira. Para a madeira *saligna* o menor valor registrado de 109,84 W, ocorrido na  $V_c$  igual a 13,4 m/s no fresamento Fpp às fibras da madeira.

Na Figura 51 visualizam-se os dados da Tabela 8 para a potência consumida no Fpa e Fpp.

Figura 51 - Gráfico da potência consumida no Fpa e Fpp, a) *citriodora* e b) *saligna*, para  $V_f$  5 m/min.



Fonte: Autor.

Os resultados obtidos demonstram que, conforme se aumenta a velocidade de corte ocorre diminuição da potência consumida e com os menores valores para a técnica de corte no fresamento perpendicular às fibras da madeira para as duas espécies. A hipótese para isto ocorrer, é que no corte Fpa a fresa percorre as fibras de modo transversal e no corte Fpp as fibras acabam por serem arrancadas perpendicularmente ocorrendo menores esforços durante o fresamento; porem, os resultados de  $R_a$  são piores por causa das fibras que ficam mais desfragmentadas.

### 5.4.3. Fresamento e tangencial concordante e discordante (F) e (C)

Na Tabela 9, podemos observar os valores de  $R_a$  para a espécie *citriodora* e *saligna* no fresamento tangencial concordante e discordante medidos a favor (F) e contra (C) para  $V_f$  de 5 m/min;  $a_p$  de 1,0 mm.

Tabela 9 – Média de  $R_a$  para *citriodora* e *saligna* no fresamento TCF, TCC, TDF e TDC, para  $V_f = 5$  m/min.

Parâmetros			$R_a$ Concordante ( $\mu\text{m}$ )		$R_a$ Discordante ( $\mu\text{m}$ )	
$V_f=5$ (m/min)	$V_c$ (m/s)	*Tukey	(F) Dp	(C) Dp	(F) Dp	(C) Dp
<i>Citriodora</i>						
	5,9	a	3,73 1,04	3,57 0,53	4,10 0,95	5,10 1,57
	8,4	a	3,63 1,82	2,77 0,84	3,47 0,76	3,87 1,89
	10,9	a	4,37 0,75	3,30 0,97	3,77 0,86	3,57 0,71
	13,4	a	2,67 0,86	3,10 1,36	4,30 1,31	3,57 0,91
<i>Saligna</i>						
	5,9	a	3,83 0,98	3,37 0,91	4,53 0,72	3,93 0,86
	8,4	a	3,37 1,09	3,13 1,42	2,80 0,58	4,67 2,04
	10,9	a	4,67 1,96	3,20 0,57	4,43 2,36	3,70 0,76
	13,4	a	3,47 1,41	3,50 1,35	2,90 0,80	4,23 1,34

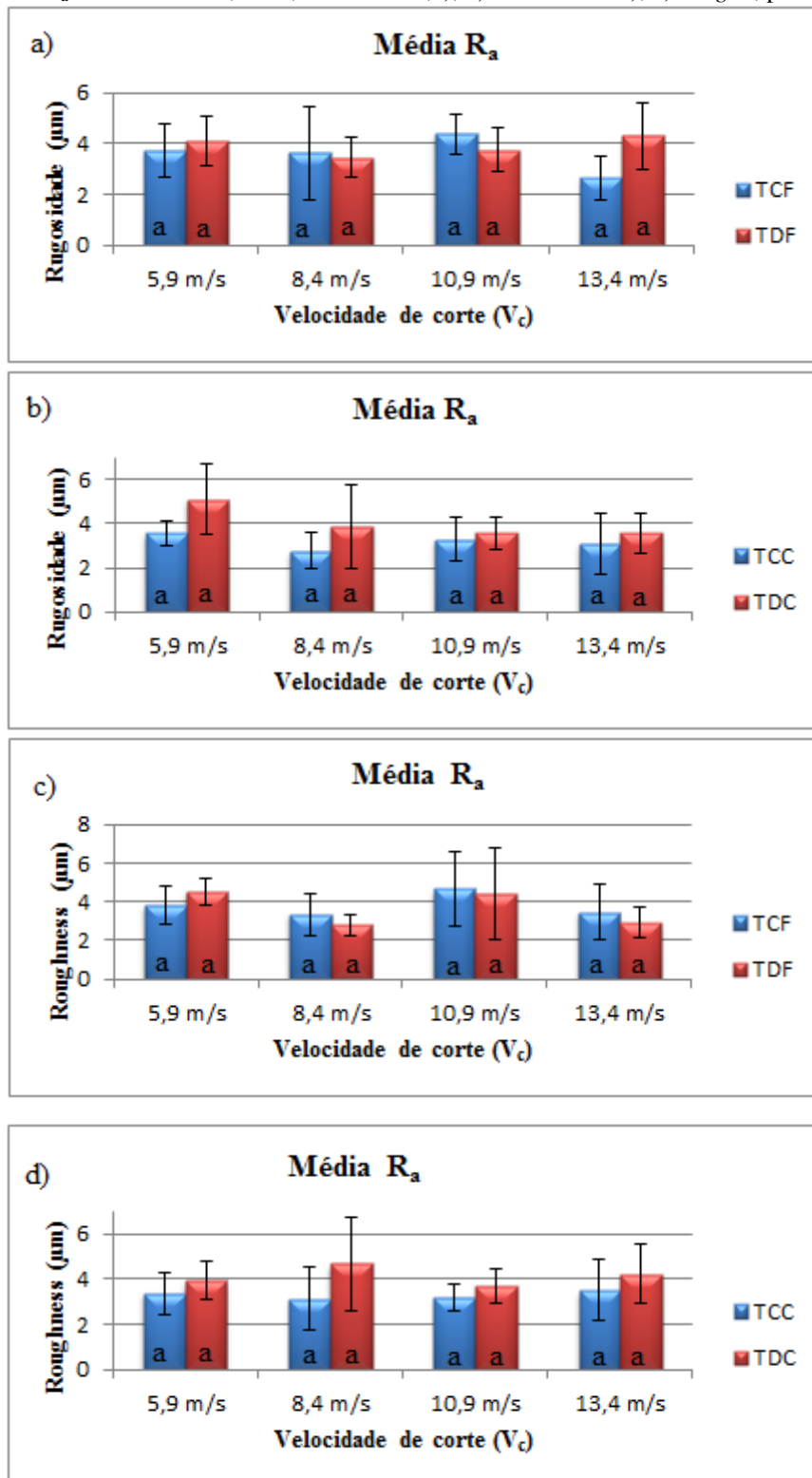
Fonte: Autor. (\*Tukey - letras diferentes indicam diferença significativa menor 5% ( $p < 5\%$ )).

Para a espécie *citriodora* conforme (Apêndice E), a melhor qualidade superficial registrada foi para  $R_a$  de 1,6  $\mu\text{m}$  ocorreu nos casos concordante (F) ou a favor na  $V_c = 8,4$  e 13,4 m/s, e o maior valor de  $R_a = 8,0 \mu\text{m}$ ; ou seja, a pior qualidade superficial medido para o movimento de corte discordante (C), que é o medido contra a direção de corte com  $V_c = 5,9$  m/s.

Para a espécie *saligna*, a melhor qualidade superficial registrada foi para  $R_a$  de 1,8  $\mu\text{m}$  ocorreu no movimento de corte concordante (F) na  $V_c = 13,4$  m/s, e o maior valor de  $R_a$  foi de 8,4  $\mu\text{m}$ ; ou seja, a pior qualidade superficial ocorreu para o movimento de corte discordante (F), com  $V_c = 10,9$  m/s.

Os gráficos referentes aos valores dos dados da Tabela 9 em Figura 52.

Figura 52 – Média de  $R_a$  nos cortes TCF, TCC, TDF e TDC; a), b) *citriodora* e c), d) *saligna*, para  $V_f = 10,9$  m/min.



Fonte: Autor.

#### 5.4.4. Fresamento TBC e TBD perpendicular às fibras

Na Tabela 10 podem ser observados os valores registrados de  $R_a$  no fresamento TBC e TBD perpendicular às fibras da madeira indicando seus desvios padrão e o teste de Tukey, os ensaios tiveram  $a_p = 1$  mm para as duas espécies, para  $V_f = 5$  m/min .

Tabela 10 – Média de  $R_a$  para a madeira *citriodora* e *saligna* no fresamento TBC e TBD, para  $V_f = 5$  m/min.

Parâmetros			Média $R_a$	
$V_f = 5$ (m/min)	$V_c$ (m/s)	*Tukey	Concordante ( $\mu\text{m}$ ) Dp.	Discordante ( $\mu\text{m}$ ) Dp.
<i>Citriodora</i>				
	5,9	a	7,67 0,61	10,0 1,40
	8,4	b	5,47 0,81	3,73 0,42
	10,9	bc	5,60 1,25	6,07 0,99
	13,4	bc	6,73 0,64	4,73 1,01
<i>Saligna</i>				
	5,9	a	4,80 1,00	5,20 0,92
	8,4	b	8,67 0,95	6,20 (a) 1,00
	10,9	a	4,73 0,81	7,33 (b) 1,01
	13,4	ab	4,80 0,53	5,60 2,11

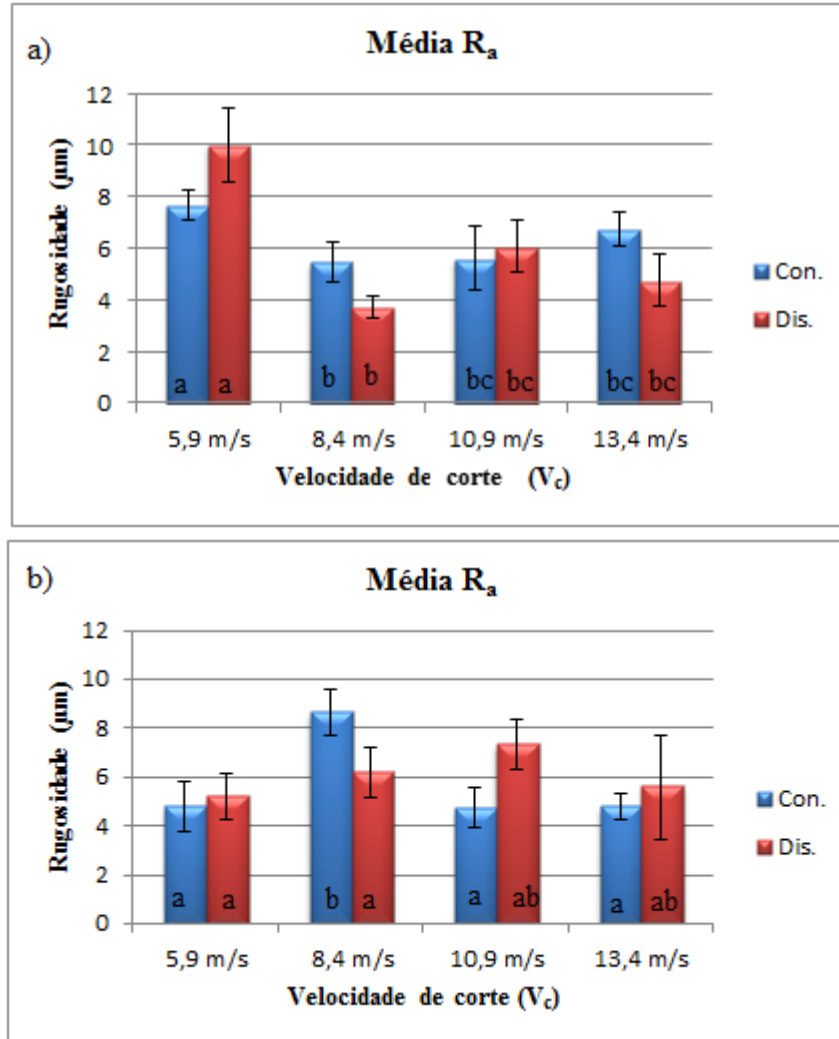
Fonte: Autor. (\*Tukey - letras diferentes indicam diferença significativa menor 5% ( $p < 5\%$ )).

Para a espécie *citriodora*: os valores registrados de  $R_a$  (Apêndice F) com a melhor qualidade superficial registrada foi para  $R_a$  de 3,4  $\mu\text{m}$  ocorreu no movimento de corte discordante,  $V_c = 8,4$  m/s, o maior valor de  $R_a = 11,4$   $\mu\text{m}$ ; ou seja, a pior qualidade superficial ocorreu para o movimento de corte discordante e  $V_f = 5$  m/min.

Para a espécie *saligna*: os valores medidos de  $R_a$  com a melhor qualidade superficial registrada foi para  $R_a$  de 3,6  $\mu\text{m}$  ocorreu no movimento de corte discordante na  $V_c = 13,4$  m/s, e o maior valor de  $R_a = 9,4$   $\mu\text{m}$ ; sendo a pior qualidade superficial que ocorreu para o movimento de corte concordante com  $V_c = 8,4$  m/s.

Os gráficos formados a partir dos valores da Tabela 10 em Figura 53.

Figura 53 - Fresamento TBC e TBD perpendicular às fibras, a) *citriodora* e b) *saligna*, para  $V_f = 5$  m/min.



Fonte: Autor.

Na Figura 53, os resultados obtidos demonstra o menor valor da rugosidade  $R_a$  para a velocidade de corte  $V_c = 8,4$  m/s no fresamento TBD e o maior valor para velocidade de corte  $V_c = 5,9$  m/s no fresamento TBD para a espécie *citriodora*. Para a espécie *saligna* ocorreu certa regularidade entre a rugosidade  $R_a$  e os parâmetros de velocidade de corte  $V_c$  utilizados, ocorrendo um maior valor para a  $V_c$  igual a 8,4 m/s sendo o maior valor da média de  $R_a$  registrado.

#### 5.4.5. Potência consumida no fresamento TC, TD, TBC e TBD

Os dados da potência consumida no fresamento tangencial concordante e discordante e das bordas perpendicular às fibras da madeira, para o ensaio que se manteve a  $V_f = 5\text{m/min}$  estão na Tabela 11.

Tabela 11 - Dados da potência consumida nos TC, TD, TBC e TBD, para  $V_f = 5\text{m/min}$ .

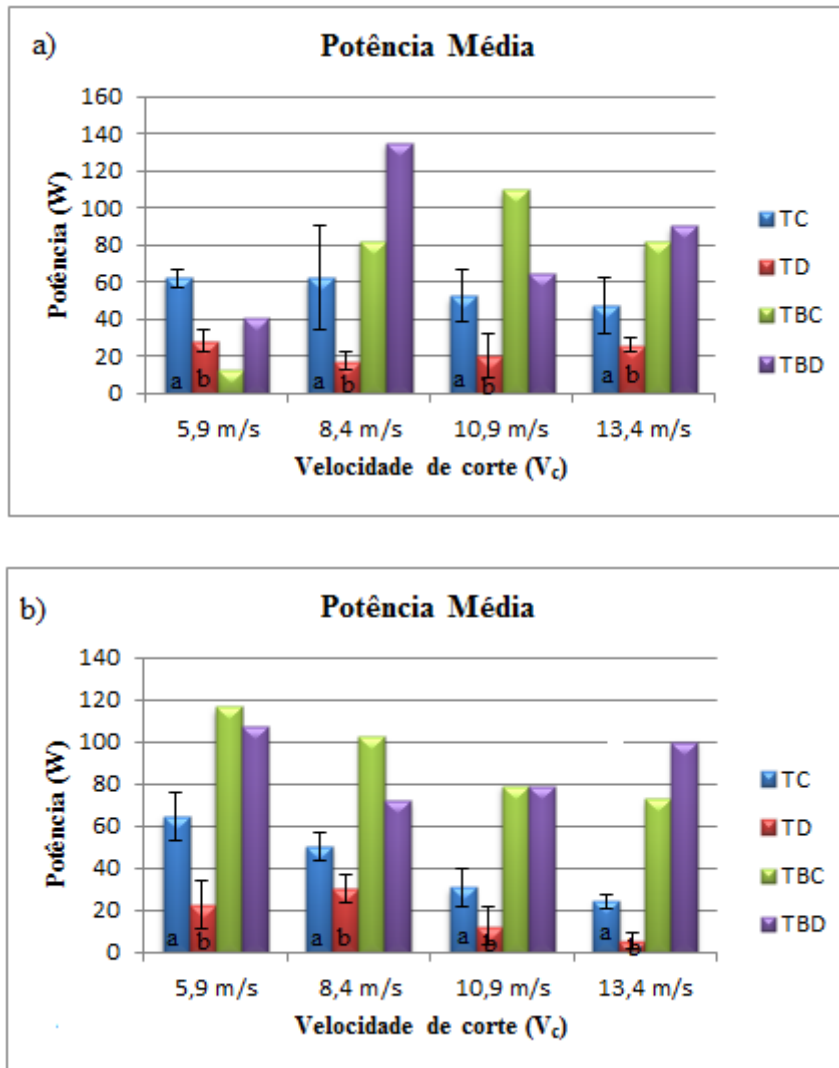
$V_c$ (m/s)	*Tukey	TC	TD	TBC	TBD
<i>citriodora</i>					
5,9	a	Dp 61,93 4,79	Dp 28,34 6,14	Dp 13,15 -	Dp 40,32 -
8,4	a	62,37 27,84	17,38 5,03	82,38 -	134,97 -
10,9	b	52,29 13,92	20,01 12,12	109,55 -	64,85 -
13,4	b	47,33 15,27	26,00 3,705	81,51 -	90,27 -
<i>saligna</i>					
5,9	a	64,42 18,48	22,20 11,40	116,56 -	106,92 -
8,4	a	50,39 16,08	30,53 6,66	102,54 -	71,87 -
10,9	b	31,11 3,75	12,27 8,97	78,88 -	78,88 -
13,4	b	24,25 13,32	5,26 3,59	72,74 -	99,91 -

Fonte: Autor. (\*Tukey - letras diferentes indicam diferença significativa menor 5% ( $p < 5\%$ )).

Na Tabela 11, podemos observar os valores da potência consumida, sendo o menor valor registrado para a madeira *citriodora* ocorrido na  $V_c$  igual a 5,9 m/s no fresamento TBC. Para a madeira *saligna* o menor valor registrado ocorreu na  $V_c$  igual a 13,4 m/s no fresamento TD.

Na Figura 54 estão ilustrados os dados da potência consumida, do fresamento tangencial concordante e discordante paralelo às fibras e das bordas perpendicular às fibras da madeira, para o ensaio que se manteve  $V_f = 5\text{m/min}$ .

Figura 54 - Gráfico da potência consumida nos TC, TD, TBC e TBD; a) *citriodora* e b) *saligna*, para  $V_f = 5\text{m/min}$ .



Fonte: Autor.

Verifica-se na Figura 54, que os menores valores médios obtidos para potência consumida ocorreu no fresamento tangencial discordante (TD), para as duas espécies pesquisadas e sendo este significativo pelo teste de Tukey.

## 5.5. ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DA MADEIRA NO (MEV)

### 5.5.1. Fresamento tangencial concordante e discordante para a espécie *citriodora*

Nas Figuras 55 e 56 pode ser observado as imagens dos corpos de prova MEV os ensaios com os parâmetros mais extremos utilizados no fresamento TC e TD na  $V_f = 3$  m/min mantendo a  $V_c$  de 10,9 m/s e  $a_p$  de 1 mm.

Figura 55 – MEV: *citriodora* concordante  $V_f$  3 m/min,  $V_c$  de 10,9 m/s e  $a_p = 1$  mm.

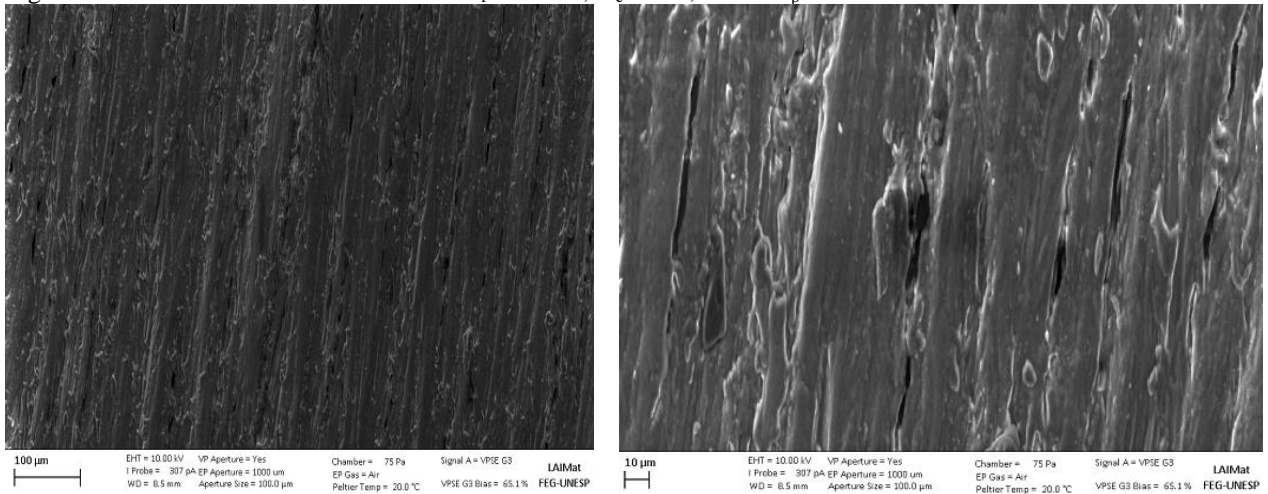
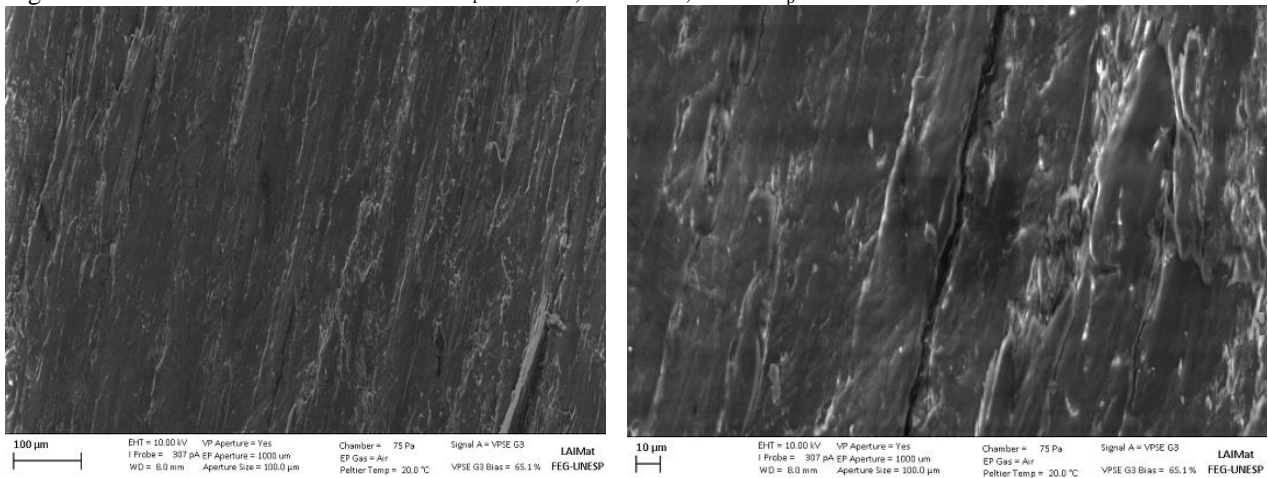


Figura 56 - MEV: *citriodora* discordante  $V_f$  3 m/min,  $V_c$  de 10,9 m/s e  $a_p = 1$  mm.



Fonte: Autor.

Observa-se nas Figuras 55 e 56 as imagens MEV que o discordante apresenta um pouco menos destacamento das fibras. A hipótese é que no corte discordante ocorre uma compressão das fibras (com a lignina da madeira), pela forma como a qual a fresa se desloca no material, provocando este efeito, que ficou evidenciado nos valores de  $R_a$  menores para o caso discordante.

Nas Figuras 57 e 58 pode ser observado as imagens dos CDPs MEV os ensaios com os parâmetros de  $V_f = 9$  m/min mantendo a  $V_c$  de 10,9 m/s e  $a_p$  de 1 mm, no fresamento tangencial concordante e discordante.

Figura 57 – MEV: *citriodora* concordante  $V_f$  9 m/min,  $V_c$  de 10,9 m/s e  $a_p = 1$  mm.

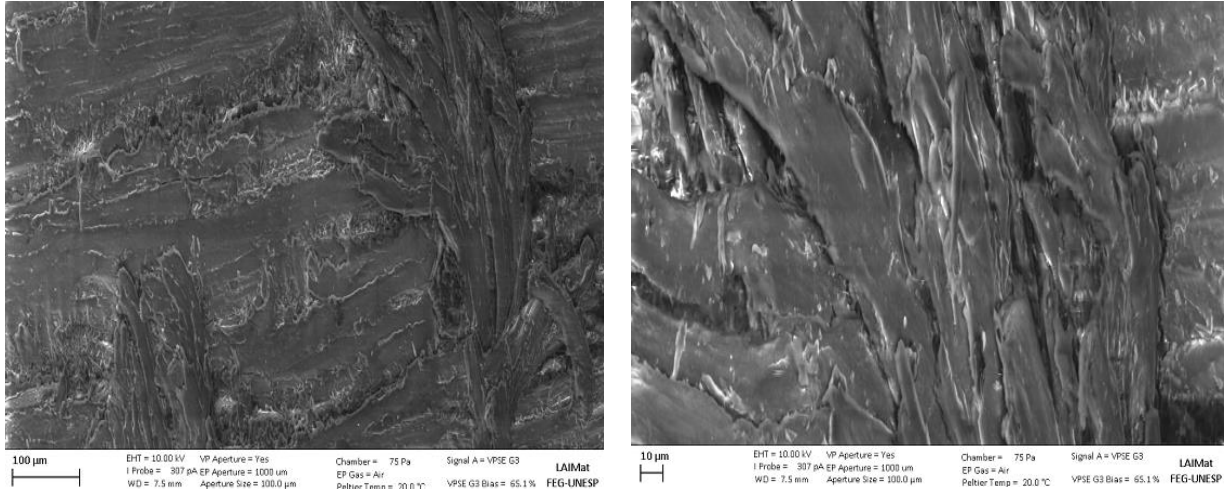
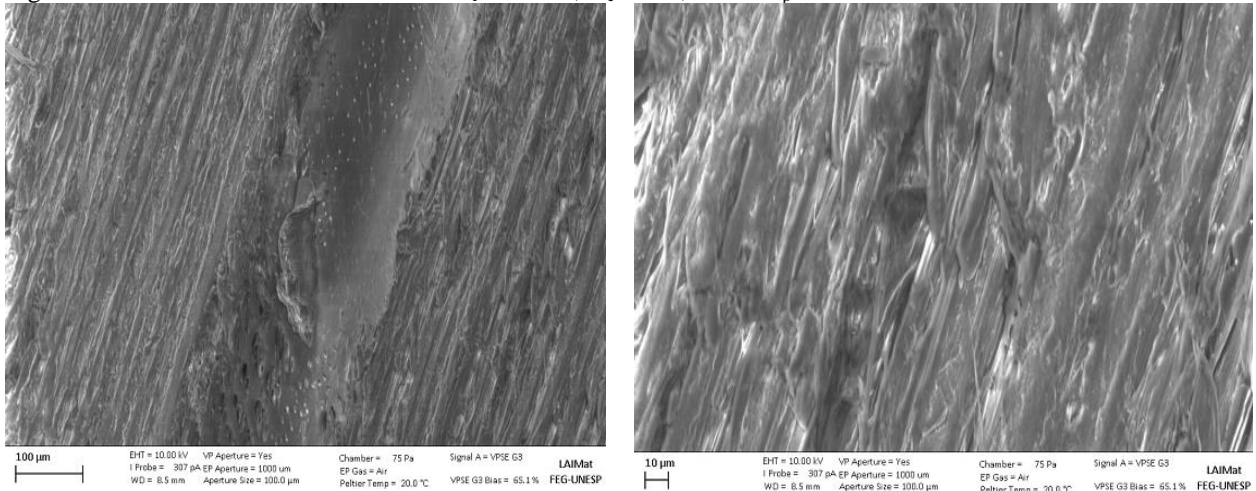


Figura 58 – MEV: *citriodora* discordante  $V_f$  9 m/min,  $V_c$  de 10,9 m/s e  $a_p = 1$  mm.



Fonte: Autor.

Observa-se nas Figuras 57 e 58 as imagens MEV, para a espécie *citriodora* que apresentam maior destacamento das fibras na  $V_f = 9$  m/min que o observado para  $V_f = 3$  m/min, na mesma  $V_c = 10,9$  m/s; isto sendo mais evidente no sentido concordante, sendo a mesma hipótese das Figuras 55 e 56 para explicar este fato, que no corte discordante ocorre uma compressão das fibras (com a lignina da madeira). Na medida de  $R_a$  ocorreram os menores valores para a  $V_f$  igual 3 m/min, sendo compatíveis com o resultado pelas imagens MEV.

### 5.5.2. Fresamento tangencial concordante e discordante para a espécie *saligna*

Nas Figuras 59 e 60 pode ser observado as imagens dos corpos de prova MEV após os ensaios com os parâmetros mais extremos utilizados no fresamento tangencial concordante e discordante na  $V_f = 3$  m/min mantendo a  $V_c$  de 10,9 m/s e  $a_p = 1$  mm.

Figura 59 – MEV: *saligna* concordante  $V_f$  3 m/min,  $V_c$  de 10,9 m/s e  $a_p = 1$  mm.

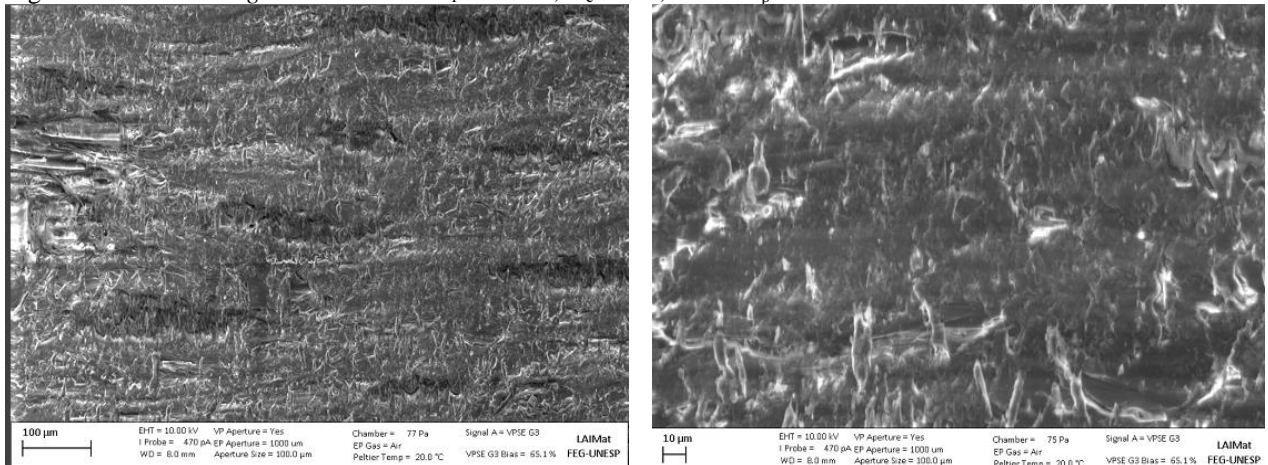
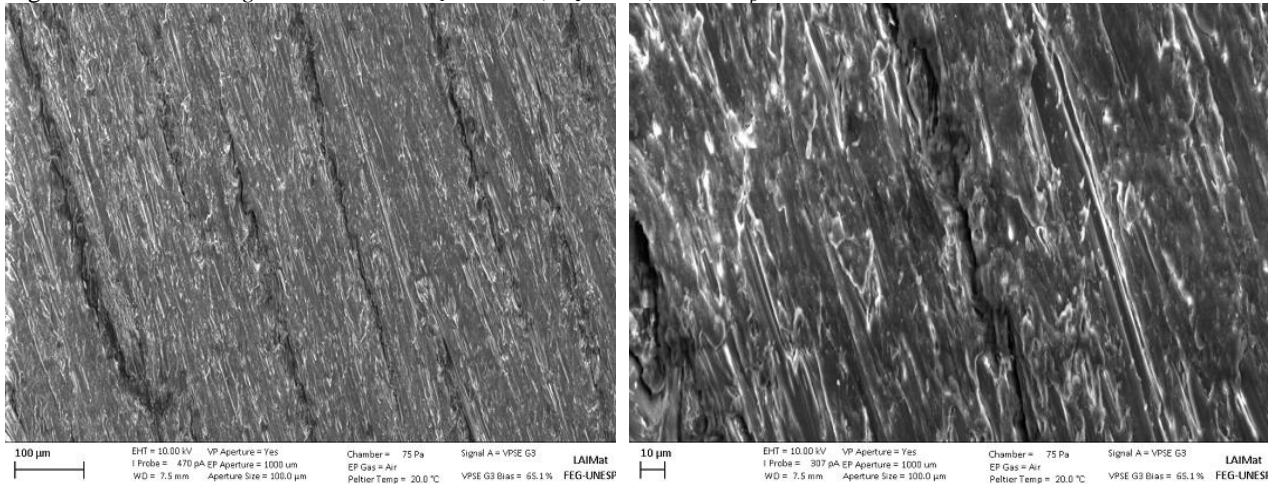


Figura 60 - MEV: *saligna* discordante  $V_f$  3 m/min,  $V_c$  de 10,9 m/s e  $a_p = 1$  mm.



Fonte: Autor.

Observa-se nas Figuras 59 e 60 imagens MEV, no sentido concordante apresenta pouco destacamento das fibras na  $V_f$  igual 3 m/min e  $V_c$  igual 10,9 m/s, no sentido concordante ocorreu menos desfragmentação das fibras no ponto central da imagem pode ser melhor observado este fato, quando se compara os movimentos de corte concordante com o discordante; podendo ser explicado pelo efeito da anisotropia das fibras da madeira.

Nas Figuras 61 e 62 observam-se as imagens dos corpos de prova MEV do ensaio no fresamento tangencial concordante e discordante na  $V_f = 9$  m/min mantendo a  $V_c$  de 10,9 m/s e  $a_p$  de 1 mm.

Figura 61 - MEV: *saligna* concordante  $V_f$  9 m/min,  $V_c$  de 10,9 m/s e  $a_p = 1$  mm.

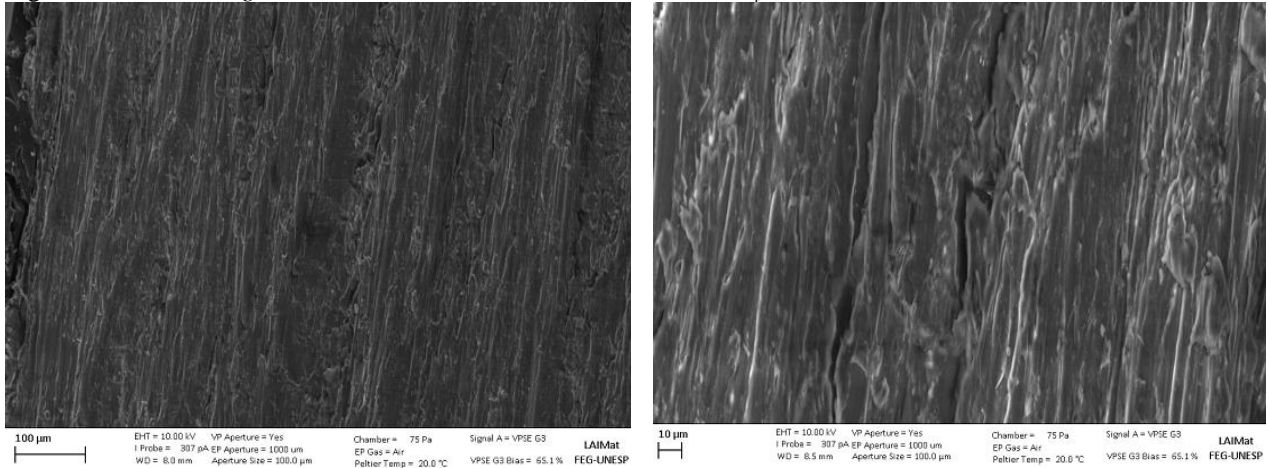
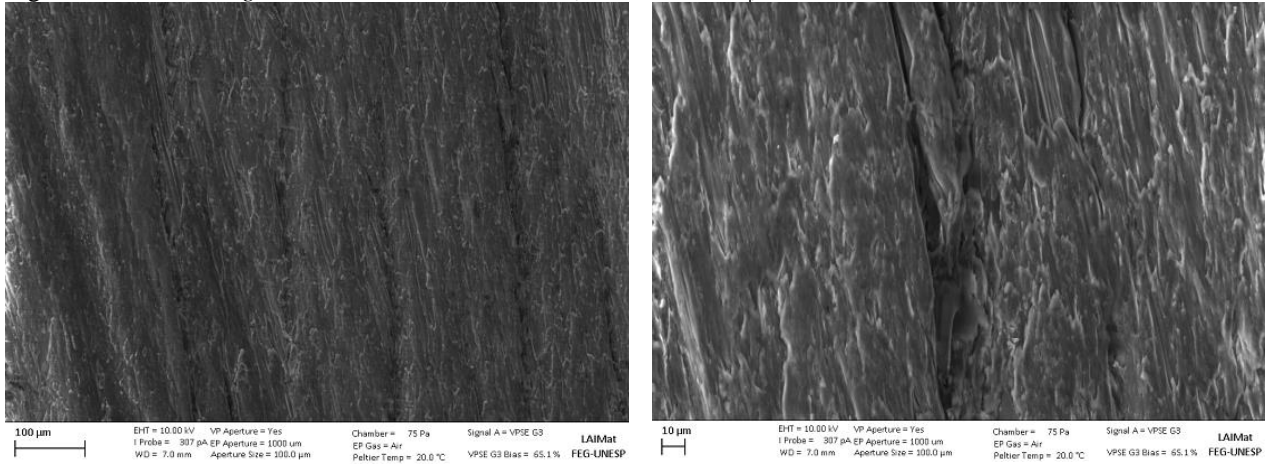


Figura 62 - MEV: *saligna* discordante  $V_f$  9 m/min,  $V_c$  de 10,9 m/s e  $a_p = 1$  mm.



Fonte: Autor.

Nas imagens das Figuras 61 e 62, para a espécie *saligna* apresenta maior destacamento das fibras com maior fragmentação na  $V_f = 9$  m/min que o observado para  $V_f = 3$  m/min, na mesma  $V_c$  de 10,9 m/s. Na medida de  $R_a$  ocorreram os menores valores para a  $V_f = 3$  m/min, sendo compatíveis com o resultado pelas imagens do MEV assim como o que ocorreu para a espécie *citriodora*.

Na literatura estudada as  $V_f$  menores geram melhores resultados de qualidade na superfície como ditos por Silva et al. 2009 que sugere promover aplainamentos com intervalos menores de

velocidades de avanço em artigo intitulado “Estudo dos parâmetros de qualidade da usinagem para diferentes usos da madeira de *Euclyptus*”.

Por Lopes et al. 2014 em artigo sobre a avaliação da rugosidade da madeira de *Eucalyptus* submetida ao fresamento que em termos médios, para a madeira das três espécies de *Eucalyptus* estudadas, as menores velocidades de avanço promoveram os menores valores de  $R_a$ , indicando a melhor qualidade da superfície da madeira, com a rotação e o número de dentes da ferramenta mantidos constantes; a tendência de aumento dos valores de  $R_a$  com o da velocidade de avanço é compatível com a literatura.

## 6. CONCLUSÃO

Esta pesquisa investigou a influência dos parâmetros de entrada no fresamento da madeira de duas espécies, concluiu-se que:

- Menores velocidades de avanço corresponderam aos melhores resultados de qualidade superficial; menores valores de rugosidade, comportamento também evidenciado na análise de superfícies MEV.
- No fresamento frontal os melhores resultados de qualidade superficial foram para o corte paralelo quando comparado com o perpendicular às fibras.
- Para o fresamento tangencial o corte discordante obteve os melhores resultados registrados para a qualidade superficial; ou seja, menores valores de rugosidade.
- Ocorre influência nos resultados de rugosidade quando medimos a favor o corte ou contra mostrando; portanto, a necessidade de padronização da direção da medida de  $R_a$ .
- Para a potência média consumida, o menor valor médio ocorreu para as maiores velocidades de corte.

Os resultados dos parâmetros que resultam na qualidade superficial adequada para as madeiras discutidos neste trabalho podem colaborar com a comunidade industrial e acadêmica.

Através da contribuição deste estudo será possível iniciar um processo de fresamento com CNC utilizando madeiras de eucalipto podendo ter maior produtividade e qualidade.

Para trabalhos futuros, a investigação da relação dos parâmetros de velocidade de corte, avanço e as técnicas dos movimentos no fresamento ainda podem ser melhorados.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas; **Anuário estatístico da ABRAF 2013 – ano base 2012**. 142p. – Brasília, DF, 2013.

AGUILERA, A.; MUÑOZ, H. Rugosidad superficial y potencia de corte en el cepillado de Acácia melanoxyton y Sequóia sempervirens. **Maderas ciencia y tecnologia**. v. 13, n.1, p. 19-28, 2011.

ALZATE, S.B.A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *E. urophylla***. 2004. 133 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 1666-87 **Standard Method for conducting machining tests of wood and wood base material (reapproved 1994)**. Philadelphia: 1995. p. 226 - 245.

AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Grandezas básicas em usinagem e retificação. Parte 1: Geometria da parte cortante das ferramentas de corte – Termos gerais, sistemas de referência, ângulos da ferramenta e de trabalho e quebra-cavacos ABNT (NBR ISO 3002-1)**. Rio de Janeiro: 2013, 70p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). **NBR 7190 –Projeto de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro, 107p, 1997.

BENJAMIN, C. A. **Estudo da estrutura anatômica e das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus grandis***. 2006, 180 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Unesp, Campus de Botucatu, Botucatu, 2006.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. 2. ed., Florida. Krieger Publishing Company, 1982, 712p.

BURDURLU, E.; USTA, I.; ULUPINAR, M.; AKSU, B.; ERARSLAN, Ç. The effect of the number of blades and the grain size of abrasives in planing and sanding on the surface roughness of European Black Pine and Lombardy Poplar. **Turkish journal of agriculture and forestry**. Ankara, Turquia, v.29, n. 4, p.315-321, 2005.

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

CABRAL, S. C. **Sinterização de compósitos super abrasivos no sistema assistidos por altas pressões e altas temperaturas**, 2012. 120 f. Tese (Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes -RJ, 2012.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 589p.

CAMILO, R.S. **Fresamento do *Eucalyptus grandis***. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado – Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista, Campus de Itapeva, 2013.

CARDOSO, F. G. **Análise de Forças de fresamento de roscas API**. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ, 2012.

CHIMELO, J.P. **Manual de Preservação de Madeiras – III (Anatomia da Madeira)**. Publicação IPT nº 1637. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo, p.41-67. 1986.

COSTA, A. – 2001. COLETÂNEAS DE ANATOMIA DA MADEIRA. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfLSsAB/apostilanatomia1>>. Acesso em: 23 fev. 2016.

DEUS, P.R. **Análise do processo de fresamento de MDF em centro de usinagem CNC**. 2014. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.; **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 5. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2001.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8. ed. São Paulo: Art Liber, 272 p. 2013.

EYMA, F. MÉAUSOONE, P.J. MARTIN, P. Strains and cutting forces involved in the solid wood rotating cutting process. **Journal of Materials Processing Technology** 148: 220–225. 2004.

FARIAS, M.G. Weingaertner, W. L. Hoffmeister, H. W. Análise sobre a vida da ferramenta de metal duro no fresamento em altas velocidades de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*. **COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Curitiba/PR. 2001.

FERRARESI, D. **Fundamentos de usinagem dos metais**. São Paulo: Ed. Blucher, 1977.

GARCIA, C.H.; MORA, A.L. **A cultura de eucalipto no Brasil**. São Paulo, SBS, 112 p. 2000.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture Relations and Physical Properties of Wood. In: Forest Products Laboratory. **Wood Handbook: wood as an engineering material**. Centennial Edition. Madison: FPL, 2010. Capítulo 4. Pp.1-20.

GAWRONSKI, T. **Optimisation of CNC routing operations of wooden furniture parts**. Int. J. Adv. Manuf. Technol. pp.2259 – 2267, 2013.

GOLI, G. et al. Up-milling and down-milling wood with different grain orientations – theoretical background and general appearance of the chips. **Eur. J. Wood Prod.**, pp. 257-263. 2009.

GONTIJO, T. G. 2012. 61 f. **Energias específica em cortes transversais em madeira roliça de *Eucalyptus* sp.** (Dissertação) Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira – Universidade Federal de Lavras - UFLA, 2012.

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

GONÇALVES, M. T. T.; SERRA, B. L.; NOCE, L. G. D. Secagem de *Eucalyptus grandis* pelo método de ventilação forçada. In: VI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeiras, v. 3. p. 173-182, **Anais do VI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeiras**, Florianópolis, 1998.

GURAU, L. An objective method to measure and evaluate the quality of sanded wood surfaces. **The Future of Quality Control for Wood & Wood Products, Edinburgh The Final Conference of COST Action E53**. 4 - 7<sup>th</sup>, 2010.

GURAU, L.; MANSFIELD-WILLIAMS, H.; IRLE, M. Separation of processing roughness from anatomical irregularities and fuzziness to evaluate the effect of grit size on sanded European oak., **Forest Products Journal**. n. 9927, p. 110-115, set. 2007.

HARRINGTON J.J: MicroFibril Angle in Wood. Ed B.G Butterfield, **IAWA/IUFRO**, New Zealand. 1998.

HENDARTO, B.; SHAYAN, E.; OZARSKA, B.; CARR, R. Analysis of roughness of a sanded wood surface. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v.28, n. 7-8, p. 775 - 780, abr., 2006.

HIZIROGLU, S. Surface roughness analysis of wood composites: a stylus method. **Forest Products Journal**, v. 46, n.7, p. 62-72. 1996.

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

IBÁ. INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Disponível em: <[http://iba.org/images/shared/iba\\_2015.pdf](http://iba.org/images/shared/iba_2015.pdf)>. Acesso em: 23 fev. 2016.

- JUNIOR, E.F.O. **Determinação das propriedades físicas e químicas da madeira de *Hevea brasiliensis* em relação ao painel de extração de látex.** 2011. 55 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.
- KACZOROWSKI, W.; BATORY, D.; SZAMAN´SKI, W.; NIEDZIELSKI, P. Carbon-based layers for mechanical machining of wood-based materials. **Wood Sci Technol** 46: 1085 – 1096. 2012.
- KILIC, M.; HIZIROGLU, S.; BURDURLU, E. Effect of machining on surface roughness of wood. **Building and Environment**, v. 41, p. 1074-1078, 2005.
- KOLMANN, F. **Tecnología de la Madera y sus Aplicaciones.** Madrid. Intituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicio de la Madera. 675p. 1959.
- KOLLMANN, F.F.P.; CÔTE, W.A.J. Principles of Wood Science and Technology. New York. v.1, 592 p. 1984.
- KLOCK U, MUÑIZ GIB, HERNANDEZ JÁ, ANDRADE AS. *Química da madeira.* 3. ed. Curitiba: FUPEF; 85 p. 2005.
- KLOCK, U. **Notas de aula sobre estrutura anatômica da madeira de coníferas, disciplina de química da madeira,** UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, Curitiba. 2012.
- KOCH, P. **Wood Machining Processes.** New York: Ronald Press Company. 530p. 1964.
- KISWANTO, G. ZARIATINA, D.L. KO, T.J. The effect of spindle speed, feed-rate and machining time to the surface roughness and burr formation of Aluminum Alloy 1100 in micro-milling operation. **Journal of Manufacturing Processes.** JMP-243; 16p. 2014.
- KRATOCHVIL, R. **Fresamento de acabamento em altas velocidades de corte para eletrodos de grafita industrial.** 2004. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- KRETSCHMANN, D. E. Mechanical Properties of Wood. In: Forest Products Laboratory. **Wood Handbook: wood as an engineering material.** Centennial Edition. Madison: FPL, 2010. Capítulo 5. Pp.1-46.
- LEITE, M.K.; BELINI, U.L.; NOLASCO, A.M.; TOMAZELO M.FO. A Madeira de Reflorestamento como alternativa para indústria de mobiliários, In: 11° Congresso Ibero-latino americano da Madeira na Construção, **Anais do 11° Congresso Iberolatino americano da Madeira na Construção,** Coimbra, Portugal, 2011.
- LEMASTER, R. L. Development of an optical profilometer and the related advanced signal processing methods for monitoring surface quality of wood machining applications. **Dissertation submitted to the graduate faculty of North Carolina state university in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor.** 2004.

LIMA, D.O.; ARAÚJO, A.C.; SILVEIRA, J.L.L. Influência da profundidade de corte e do avanço na força do corte no fresamento de faceamento. **CONEM – Congresso nacional de Engenharia Mecânica**. São Luís – Maranhão. 2013.

LOGSDON, N. B. FINGER, Z. PENNA, E.S. Caracterização físico-mecânica da madeira de Cedro-marinheiro, *Guarea trichiliodes* L. (Meliaceae). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 77, p. 43-51, mar. 2008.

LOPES, C.S.D. **Caracterização da madeira de três espécies de eucalipto para uso em movelaria**. 2007. 88 f. Dissertação (mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.

LOPES, C.S.D; NOLASCO, A.M.; FILHO, M.T.; DIAS, C.T.S. Avaliação da rugosidade superficial da madeira de *Eucalyptus* sp submetida ao fresamento periférico. **Revista Cerne**. V.20, n.3. p.471 – 476. 2014.

MARCO FILHO, M. A. R. S. **Projeto de fabricação em comando numérico do corpo de uma guitarra elétrica**. 2013. 73p. Trabalho de Conclusão de curso em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro-RJ. UFRJ. 2013.

MACHADO, A. R. **Teoria da uninagem dos materiais**. São Paulo: Ed. Blucher, 2008.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A.; COELHO, R.; SILVA, Marcio B. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Ed. Blucher, 371 p. 2009.

MAIA, L. H. A. **Influência das condições de corte do fresamento do aço baixa liga nos sinais vibracionais e de emissão acústica**. Belo Horizonte, 2009.

MAGOSS, E. **General Regularities of Wood Surface Roughness**. v.4. - Department Of Wood Engineering, University of West Hungary, Sopron, Hungary. p.81-86. 2008.

MANHÃES, A. **Caracterização da cadeia produtiva do bambu no Brasil abordagem preliminar**. Monografia: Curso de Engenharia Florestal – Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Seropédica, Fevereiro de 2008.

MARCHIORI, J.N.C.; SOBRAL, M.; **Dendrologia das Angiospermas Myrtales**. Santa Maria: Ed. da UFSM, 1997.

MARCO FILHO, M. A. **Projeto de fabricação em comando numérico do corpo de uma guitarra elétrica**. Trabalho de Conclusão de curso em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro-RJ. UFRJ. 73p. 2013.

NÉRI, A. C. **Parâmetros de corte na usinagem de madeiras de reflorestamento**. 2003. 157f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campina, Campinas, 2003.

OLIVEIRA, J. T. S. Caracterização da madeira de eucalipto para construção civil. São Paulo. 1997. 252 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

OLIVEIRA, J.T.S. O potencial do eucalipto para a produção de madeira sólida. **Revista da Madeira**, n.75, p. 1-8, ago. 2003.

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade específica básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 381-385, maio/jun. 2003.

OHUCHI, T.; MURASE, Y. Milling of wood and wood based materials with a computerized numerically controlled router V: development of adaptive control grooving system corresponding to progression of tool wear. **The Japan Wood Research Society**, pp. 395 – 400, 2006.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 223p.

PINHEIRO, C. **Efeitos do teor de umidade da madeira no fresamento de *Pinus elliottii***. 2014. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, UNESP – Univ. Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

PINTAÚDE, G. FARIAS, M. C. M. KOHNLEIN, M. TANAKA, D. K. SINATORA, A. Desgaste abrasivo de ferramentas de corte utilizados na indústria madeireira. **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2000**. Natal, RN. Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, v. 1. p. 931-938. 2000.

RIGATTI, A. M. Y. **Avaliação da força de usinagem e energia específica de corte no fresamento com alta velocidade de corte**. 2010. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

SCM GROUP S.P.A (Italy). **Catálogo TECH Z1**, ITA – SPA, 2011. 24 p.

SALONI, D. LEMASTER, R. L. JACKSON, S. D. Abrasive machining process characterization on material removal rate, final surface texture and power consumption for wood. **Forest Products Journal**, v.55, n12, p35-52, dez. 2005.

SANTOS, S.C; SALES, W.F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. 1ª ed. Ed. Artliber Ltda. São Paulo, 2007.

SEVERO, E. T. D. **Estudo sobre o efeito da vaporização nas propriedades e comportamento de secagem na madeira de *Eucalyptus dunnii* Maid**. 1998. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

SILVA, J. R. M.; LIMA, J. T.; BRAGA, P. C; TRUGILHO, P. F. A utilização de rugosímetro na qualificação das superfícies usinadas em madeiras de *Eucalyptus sp*. **Anais do 10º Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira – EBRAMEM**. Brasil - São Pedro – SP. 2006 (a).

SILVA, J. R. M.; BRAGA, R. A. J.; BERNARDES, F. F.; RABELO, G. F. Superfícies usinadas em madeiras de *Eucalyptus sp* qualificadas por metrologia óptica - Laser Ne-He. **10º ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA**, 2006, São Pedro. **Anais:** Instituto Brasileiro da Madeira e Estruturas de Madeira, 2006 (b).

SILVA, J. R. M.; MARTINS, M.; OLIVEIRA, G. M. V.; BRAGA, P. P. C. **Parâmetros de qualidade da usinagem para determinação dos diferentes usos da madeira de *Eucalyptus***. **CERNE**, vol. 15, núm. 1, mar., pp. 75-83 Universidade Federal de Lavras, Brasil, 2009.

SILVA, J.C.; OLIVEIRA, J.T.S. Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm., em diferentes condições de umidade relativa ao ar. **Revista árvore**, Viçosa, v. 27, n.2, p. 233-239, mar./abr. 2003.

SOUZA, A. J. D. **Proposição de um novo método de medição do desgaste em ferramentas de corte empregadas em operações de fresamento da madeira**. 2009. 108 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

SOUZA, E.M.; SILVA, J.R.M.; LIMA, J.T.; NIPOLI, A.; RAAD, T.J.; GONTIJO, T.G. Specific cutting energy consumption in a circular saw for *Eucalyptus* stands vm01 and mn463. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 1, p. 109-115, jan./mar. 2011.

TEIXEIRA, C. R.; CASANOVA, C. A.; M., FERREIRA FILHO, D.; FERNANDES, J. A.; BALZARETTI, N. M. Influência da anisotropia da madeira no desgaste das ferramentas diamantadas. **Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 6, 2011, Caxias do Sul:** Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2011.

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

TIBURCIO, U. F. O. **Aspectos teóricos e tecnológicos relacionados à medição da rugosidade de madeiras submetidas ao processo de lixamento**. Anais do 12º Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira – EBRAMEM. Brasil - Lavras –MG. 2010.

TIBURCIO, U. F. O.; RIBEIRO, M. V.; GONÇALVES, M.T.T.; SOUZA, A.J.D. Análise do acabamento superficial na usinagem de madeiras em processos de torneamento e lixamento. **Anais do 10º Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira - EBRAMEM**. Brasil - São Pedro /SP. 2006.

TRUGILHO, P.F.; GOMES, A.F.; ROSADO, A.F.; NEVES, T.A.; COUTO, A.M.; PAULA, L.E.R.; VALLE, M.L.A. Medida indireta das tensões de crescimento na árvore viva de eucaliptos, In: 11º Congresso Ibero-latino americano da Madeira na Construção, **Anais do 11º Congresso Ibero-latino americano da Madeira na Construção**, Coimbra, Portugal, 2011.

TRUGILHO, P.F.; ROSADO, S.C.S.; LIMA, J.T.; MORI, F.A.; CAIXETA, R.P. Variação dimensional e densidade da madeira em árvore de *Eucalyptus*. In: ENCONTRO NACIONAL EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, Uberlândia. Anais eletrônicos São Carlos: IBRAMEM, 2002.

VALVERDE, S. Plantações de Eucalipto no Brasil. . **Revista da Madeira**. Ed. nº 107. set 2007.

VIDAURRE, G.; VITAL B.R.; SILVA, J.C.; OLIVEIRA, J.T.S. Madeira serrada de Eucalipto. **Revista da Madeira**. Ed. nº 102, jan. 2007.

XAVIER, F. A. **Aspectos tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN**. 2003. 146 f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica). Universidade federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC. 2003.

WRUBLACK, O. PILATTI, L.A. PEDROSO, B. Parâmetros e métodos de usinagem e sua relação com os custos do processo e o acabamento final do produto. **CONEM – Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais**. Campos Gerais – MG. 2008.

WIEDENHOEFT, A. Structure and Function. In: Forest Products Laboratory. **Wood Handbook: wood as an engineering material**. Centennial Edition. Madison: FPL, 2010. Capítulo 3. p.1-18.

Apêndice A: Valores medidos de  $R_a$  no Fresamento frontal e  $V_c$  10,9 m/s.

<i>Corymbia citriodora</i>			<i>Eucalyptus saligna</i>		
$V_f$ (m/min)	Perpendicular $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Paralelo $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$V_f$ (m/min)	Perpendicular $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Paralelo $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
<b>3</b>	5,4	4,6	<b>3</b>	5,2	4
	5	5		5,2	4,6
	5,4	3,8		5,6	3,2
	7,6	3		5,4	4,8
	5,8	2,8		5,8	3,2
	5,6	3,6		7,2	2,2
<b>5</b>	12,4	8	<b>5</b>	9,8	7,8
	11	10,6		10,2	8,6
	13,6	7,6		12,8	6
	7,4	5,4		5,2	5,2
	14,4	5,4		8,2	6,2
	7,4	4,6		6,8	4,6
<b>7</b>	7,2	7	<b>7</b>	17	14,4
	6,4	4,2		14,8	7
	5,8	4,6		10,4	9,4
	8,4	5,8		13,2	6,6
	6,6	6,2		16,6	11
	13	9,4		12,8	7
<b>9</b>	11,4	4,8	<b>9</b>	11	8,2
	8,4	7,8		10,2	7,4
	11,2	6,6		12,8	8
	9,6	5,2		17,6	9,2
	8,6	7,4		13,8	7
	11,4	5,8		12,6	8,8

Apêndice B: Valores medidos de  $R_a$  para o Fresamento TCF, TCC, TDF e TDC;  $V_c$  10,9 m/s.

<i>Corymbia citriodora</i>					<i>Eucalyptus saligna</i>			
$V_f$ (m/min)	TCF $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	TCC $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	TDF $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	TDC $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	TCF $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	TCC $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	TDF $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	TDC $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
<b>3</b>	2	1,6	2,6	1,8	3,2	3,2	2,8	2,4
	2,2	2	2,2	3,8	2,2	2,2	4	2
	4	5,2	2,4	1,6	2,2	2,2	2,8	2,4
	3	1,4	4,8	3	3,8	3,8	3,8	2,2
	4	2,8	1,2	2,8	3	3	2,8	3,8
	4,2	2	2,2	5,2	1,6	1,6	2,8	3
<b>5</b>	5	5	3,6	3,4	3,2	3	2,4	4
	3,2	4,2	4,6	2,4	2,8	4,8	4,6	4,8
	3,8	3,4	2,4	4	3,4	7,8	8,4	4
	2,6	4,8	3,6	3,2	4,2	5,4	5,8	3,2
	2,8	5,2	3,6	4,2	2,6	4,8	2,6	3,6
	2,4	3,6	4,8	4,2	3	2,2	2,8	2,6
<b>7</b>	3,2	1,8	2,4	2,4	7,6	5,4	4	3,4
	2,8	2,2	3,8	3,8	4,6	5	6,2	4,6
	4,2	3	2,6	4,6	4,6	9,6	4,4	7
	2,8	4,2	5,6	3,2	4,8	7,8	6	4,4
	5	3,6	2,6	2	6,2	5	6,6	8,2
	5,8	4	2,2	3,8	4,6	6,2	6	10,8
<b>9</b>	2,6	7,2	5,2	4,8	3	4	6,2	4,2
	4,6	3,8	2,8	3,4	3,8	4	3,4	5,4
	3,6	3,6	4,2	2,4	4,6	5,4	6,4	2,4
	3,6	4,2	5,8	2,8	6,6	3,8	5,2	4,8
	5,8	3	4	4,2	4,6	7,4	6,4	3,4
	3,6	2,2	3,4	2,8	4,4	7	2,6	8,2

Apêndice C: Fresamento TBC, TBD perpendicular às fibras e  $V_c$  10,9 m/s.

<i>Corymbia citriodora</i>						
$V_f$ (m/min)	Discordante $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )			Concordante $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )		
<b>3</b>	6,4	6,2	5,6	4,2	5,4	3,8
<b>5</b>	5,6	5,4	7,2	6,0	4,2	6,6
<b>7</b>	3,6	2,4	5,8	3,8	4,8	4,6
<b>9</b>	6,8	4,2	5,0	14,0	12,4	13,6
<i>Eucalyptus saligna</i>						
<b>3</b>	4,4	3,6	3,6	2,8	2,2	3,0
<b>5</b>	8,4	6,4	7,2	5,6	4,0	4,6
<b>7</b>	6,8	3,8	3,8	4,6	5,8	4,2
<b>9</b>	7,2	5,4	4,2	7,8	5,0	8,0

Apêndice D: Fresamento Frontal paralelo e perpendicular às fibras para  $V_f$  5 m/min.

<i>Corymbia citriodora</i>		
$V_c$ (m/s)	Perpendicular $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Paralelo $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
<b>5,9</b>	31,2	11,2
	28,2	9,6
	10	9
	11,6	8
	10,4	11,4
	25,4	10,8
<b>8,4</b>	11,4	6,6
	13,4	5,6
	7	4,2
	7	6
	8	7,2
	7,8	4,6
<b>10,9</b>	12,4	8
	11	10,6
	13,6	7,6
	7,4	5,4
	14,4	5,4
	7,4	4,6
<b>13,4</b>	9,4	8,6
	13,2	5,8
	10,6	5,8
	10,2	7,6
	9,2	6,4
	8,8	4,4

<i>Eucalyptus saligna</i>		
$V_c$ (m/s)	Perpendicular $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Paralelo $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
<b>5,9</b>	9,6	6,2
	6,4	6,2
	8,4	5,6
	8,6	7,4
	8,4	5,6
	8,6	6,2
<b>8,4</b>	10,8	10,4
	9,2	6,4
	11,8	9,2
	8,8	7,4
	8,4	9,2
	10,4	4,4
<b>10,9</b>	9,8	7,8
	10,2	8,6
	12,8	6
	5,2	5,2
	8,2	6,2
	6,8	4,6
<b>13,4</b>	10	6,8
	6,4	6,4
	11,8	7,2
	10,6	7,8
	8,2	6,4
	4,6	5,8

Apêndice E: Valores medidos de  $R_a$  para o Fresamento TCF, TCC, TDF e TDC;  $V_f$  5 m/min.

<i>Corymbia citriodora</i>					<i>Eucalyptus saligna</i>			
$V_c$ (m/s)	TCF $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	TCC $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	TDF $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	TDC $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	TCF $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	TCC $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	TDF $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	TDC $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
<b>5,9</b>	4,2	4,4	2,6	4,4	4,2	3,4	4,8	4,8
	3,8	4,6	3,6	4,2	3,4	3,6	4,6	4
	3,2	2,6	4	8	2,4	3,6	5,4	4,8
	2,8	4,8	5	5,8	2,4	5,8	5	4,2
	3,4	2,4	4,2	3,8	4,6	3,4	3,4	3
	4	3,6	5,2	4,4	3,2	3,2	4	2,8
<b>8,4</b>	2,6	6,4	4,4	6,2	2,6	2,4	2,6	7,4
	3,6	3,4	3	2,4	2,6	3,4	2,4	2,6
	1,6	3	4,2	2,4	2,8	4	3,2	6
	3,6	2	2,4	2	2,2	2,8	3	3
	2	5,2	3,6	4,2	6	5,2	3,6	6
	3,2	1,8	3,2	6	2,6	2,4	2	3
<b>10,9</b>	5	5	3,6	3,4	3,2	3	2,4	4
	3,2	4,2	4,6	2,4	2,8	4,8	4,6	4,8
	3,8	3,4	2,4	4	3,4	7,8	8,4	4
	2,6	4,8	3,6	3,2	4,2	5,4	5,8	3,2
	2,8	5,2	3,6	4,2	2,6	4,8	2,6	3,6
	2,4	3,6	4,8	4,2	3	2,2	2,8	2,6
<b>13,4</b>	5,6	4,2	6,2	4,2	3,6	2,2	3	3
	3,2	1,8	5,6	3,6	5,2	4,8	2,2	3,8
	2,4	2	3,8	3,2	4	3,8	3,4	4
	1,6	3	3,6	2,6	4,4	2,4	2,2	6,4
	3,2	2,6	2,8	5	2	2,2	4,2	3
	2,6	2,4	3,8	2,8	1,8	5,4	2,4	5,2

Apêndice F: Fresamento TBC, TBD perpendicular às fibras e  $V_f$  5 m/min.

<i>Corymbia citriodora</i>						
$V_c$ (m/min)	Discordante $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )			Concordante $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )		
<b>5,9</b>	10,0	11,4	8,6	7,8	8,2	7,0
<b>8,4</b>	3,4	4,2	3,6	5,6	6,2	4,6
<b>10,9</b>	5,6	5,4	7,2	6,0	4,2	6,6
<b>13,4</b>	4,6	5,8	3,8	6,0	7,0	7,2
<i>Eucalyptus saligna</i>						
<b>5,9</b>	4,2	5,4	6,0	4,8	5,8	3,8
<b>8,4</b>	8,4	6,4	7,2	5,6	4,0	4,6
<b>10,9</b>	3,6	7,8	5,4	4,4	5,4	4,6
<b>13,4</b>	5,2	7,2	6,2	9,4	7,6	9,0