

**UNESP**  
**Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá**

**PRISCILA ROEL DE DEUS**

**ANÁLISE DO PROCESSO DE FRESAMENTO DE MDF  
EM CENTRO DE USINAGEM CNC**

Guaratinguetá  
2015

PRISCILA ROEL DE DEUS

ANÁLISE DO PROCESSO DE FRESAMENTO DE MDF  
EM CENTRO DE USINAGEM CNC

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

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

Guaratinguetá  
2015

D486a Deus, Priscila Roel de  
Análise do processo de fresamento de MDF em centro de  
usinagem CNC / Priscila Roel de Deus. – Guaratinguetá , 2014  
146 f.: il.  
Bibliografia: f.: 135-146

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica -  
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia do  
Campus de Guaratinguetá, 2014

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

1. Painéis de madeira 2. Microscopia eletrônica de varredura  
I. Título

CDU 674.03

*PRISCILA ROEL DE DEUS*

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

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
ÁREA: MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

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

  
Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO  
UNESP/FEG

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

  
Prof. Dr. IVALDO DE DOMÊNICO VALARELLI  
UNESP/BAURU

  
Prof. Dr. FÁBIO MINORU YAMAJI  
UFSCAR/Sorocaba

## **DADOS CURRICULARES**

### **PRISCILA ROEL DE DEUS**

NASCIMENTO	01.10.1984 – ITAPEVA / SP
FILIAÇÃO	Luiz Francisco Roel Elsa dos Santos Rosário Roel
2002/2005	Curso de Graduação em Química -Instituto Manchester Paulista de Ensino Superior.
2007/2010	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2011/2015	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

de modo especial, à minha filha *Maria* e ao meu marido *Cristian*, que sacrificaram a nossa convivência para me ajudar!

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus principalmente por minha saúde, também por minha inteligência e capacidade. Sou grata por manter em mim a perseverança e alegria.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Manoel Cléber Sampaio Alves* pela compreensão, humanidade e respeito, me incentivou sempre. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

A minha filha *Maria Roel de Deus* pelos sorrisos, abraços, carinho e gargalhadas que fizeram essa jornada mais leve.

Ao meu marido *Cristian Fabio de Deus* pela paciência, compreensão, companheirismo e amor.

Aos meus pais *Luiz Francisco Roel e Elsa Santos R. Roel*, e meus irmãos *Ronney Roel, Robson Roel e Luiz Antonio Roel* pela simplicidade do amor que me faz seguir e pelo incentivo nos estudos.

Aos meus sobrinhos *Pedro Eduardo Roel e José Francisco Pinheiro Roel* que com tanta pureza aliviavam o cansaço com as brincadeiras de todos os dias.

Ao *Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves* pelo incentivo através da montagem e funcionamento do centro de usinagem da UNESP Itapeva-SP.

Ao *Prof. Dr. Luiz Rogerio de Oliveira Hein* que colaborou com os ensaios desta tese.

Aos colegas *Maria Renata Pereira Rocha, Paulo Roberto Alves, Cleverson Pinheiro, Luciano Rossi Bilesky e Romulo Rezende Dias* que tanto colaboraram com este trabalho.

Aos funcionários da UNESP que colaboraram com a pesquisa *Juliano Rodrigo de Brito, David José Tenório de Aquino e Tiago Matos Andrês*.

Aos amigos *Vanessa Tavares, Gabriel Moraes, Nádia Macedo, Fabrício Favaro, Marcela Lahoud, Daniele Fernanda Santos Fernanda Tereza Macedo Lahoud Dias, Isadora Maria Lahoud Dias, Andrei Muzel e Jose Carlos Silva* incentivadores que participaram comigo desta fase e hoje se alegram com minha alegria,

Aos funcionários da secretaria da UNESP pela presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

“Tome cuidado com sua vida, talvez ela seja o único evangelho que as pessoas leiam.  
(São Francisco de Assis)”



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.

## RESUMO

O painel de madeira reconstituída ou painel a base de madeira MDF (Medium Density Fiberboard) é um produto industrial produzido a partir de fibras lignocelulósicas. É um material bastante empregado, pois apresenta homogeneidade, estabilidade dimensional, ótimo acabamento e resistência mecânica próxima a madeira maciça. O fresamento é um método de usinagem muito utilizado na indústria moveleira, com obtenção de acabamento superficial de qualidade. Apesar da notável relevância do tema existem poucos trabalhos específicos tratando do processo de fresamento em MDF utilizando máquinas de Comando Numérico Computadorizado (CNC). O objetivo deste trabalho é avaliar o fresamento de MDF em centro de usinagem CNC através da análise da rugosidade, consumo de potência e análise de imagens da superfície. Os painéis MDF foram fresados no sentido concordante com profundidade de usinagem de 0,5; 1 e 1,5 mm e no sentido discordante com profundidade de usinagem de 3; 6 e 9 mm. Ambos com seis repetições, quatro velocidades de corte 804 m/min, 630 m/min, 402 m/min e 201 m/min e três velocidades de avanço 6, 4 e 2 m/min todos os ensaios na direção tangencial e frontal. Analisou-se os parâmetros de Rugosidade Média (Ra) e Total (Rt), a potência consumida e a integridade das peças na microscopia eletrônica de varredura e topografia. Observou-se que a rugosidade apresentou menores valores nas velocidades de corte de 603 e 804 m/min e velocidade de avanço entre 2 e 4 m/min. A profundidade de usinagem de 1 e 1,5 mm no tangencial e 3 mm no frontal apresentaram resultados satisfatórios para a superfície. Concluiu-se que os parâmetros aqui estudados influenciam significativamente o acabamento, resultando em superfícies irregulares que podem reduzir a qualidade dos produtos. O fresamento tangencial discordante apresenta rugosidade com valores baixos, ou seja, mais satisfatória.

**PALAVRAS-CHAVE:** Painéis. Rugosidade. Acabamento. Madeira. MEV.

DEUS, P.R. **Analysis of the MDF milling CNC machining center.** 2014. 133 f. Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

### **ABSTRACT**

The MDF (medium density fiberboard) is an industrial product manufactured from lignocellulosic fibers. It is quite a material used because it presents homogeneity, dimensional stability and mechanical strength next to solid wood. Milling is a machining method widely used in the furniture industry; despite the remarkable relevance of the subject there are few works dealing with the specific MDF milling process using Computerized Numerical Control (CNC) machines. The objective of this study is to evaluate the MDF milling in CNC machining center by analyzing roughness, power consumption and surface image analysis. The MDF panels were concordant direction with the machined depth of cut of 0.5; 1 to 1.5 mm and the discordant direction with depth of cut of 3; 6 and 9 mm. Both of six replicates, four cutting speed 804 m/min 630 m/min 402 m/min and 201 m/min and three forward speeds 6, 4 and 2 m/min in all tests and in the tangential direction and front. Analyzed the parameter of roughness average (Ra) and roughness total (Rt), the power consumed and the integrity of parts on scanning electron microscopy and topography. It was observed that the surface roughness showed lower values for the cutting speeds of 603 and 804 m / min, feed rate between 2 and 4 m / min. The depth of cut of 1 mm and 1.5 mm in tangential and 3 exhibited satisfactory results for front surface. It was concluded that the parameters studied here significantly influence the finish, resulting in uneven surfaces that can reduce the quality of products. The objecting tangential milling presents with low roughness values, that is more satisfactory.

**KEYWORDS:** Panels. Roughness, Finishing wood. Wood.SEM.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema ilustrativo do processo de produção de painéis MDF. ....	23
Figura 2 - Pulverizador de resina Grencó.....	24
Figura 3 - Processo seco para obtenção de painéis MDF.....	25
Figura 4 - MDF na pré prensa para homogeneizar a densidade. ....	26
Figura 5 - Etapa de resfriamento do MDF. ....	27
Figura 6 - Fresamento frontal.....	32
Figura 7 - Fresamento Tangencial.....	32
Figura 8 - Fresamento concordante.....	33
Figura 9 - Fresamento Discordante. ....	34
Figura 10 - Ângulos no fresamento.....	35
Figura 11 - -- Velocidade de corte, Velocidade de avanço e Profundidade de usinagem.....	37
Figura 12 - Largura de usinagem (ap). ....	37
Figura 13 - Movimentos, direções e velocidades da ferramenta e da peça. ....	38
Figura 14 - Linha média e áreas mínimas superior e inferior.....	39
Figura 15 - Comprimentos para a avaliação de rugosidade. ....	40
Figura 16 - Sistema da linha média. ....	41
Figura 17 - Rugosidade média Ra ..... 41	41
Figura 18 - Rugosidade Total.....	42
Figura 19 - Parâmetros de corte para a rugosidade superficial.....	45
Figura 20 - Tipos de cavaco- (a) Cavaco tipo I, (b) cavaco tipo II e (c) cavaco tipo III. ....	47
Figura 21 - Relação entre a rugosidade em relação e a velocidades de corte, de avanço e profundidade de usinagem.....	49
Figura 22 - Influência do sentido de corte na Rugosidade Ra. ....	51
Figura 23 - Rugosidade superficial.....	52
Figura 24 - Relação da profundidade de usinagem e rugosidade superfície.....	52
Figura 25 - Relação da velocidade de avanço e rugosidade superfície. ....	53
Figura 26 - -- Relação da rotação e rugosidade superfície.....	53
Figura 27 - Valores médios da rugosidade superficial dos painéis e madeiras analisadas. ....	55
Figura 28 - Mesa base Fresadora CNC Tech Z1. 6a - dispositivos de fixação com ventosas. ....	56
Figura 29 - A máquina Furadeira - Fresadora CNC Tech Z1.....	57
Figura 30 - Parâmetros de rugosidade em função da velocidade de corte.....	57
Figura 31 - Aspecto da rugosidade das amostras. a) 3000 rpm e 0,5 m/min b) 3000 rpm e 5 m/min. .	58
Figura 32 - Rugosidade média em função da velocidade de corte e da velocidade de avanço.....	59
Figura 33 - Serra seccionadora TECMATIC. ....	67
Figura 34 - Corpo de prova em MDF para fresamento tangencial. ....	68
Figura 35 - Corpo de prova em MDF para fresamento frontal.....	68
Figura 36 - Corpo de prova de densidade e umidade. ....	69
Figura 37 - Paquímetro e Micrômetro. ....	70
Figura 38 - Pesagem do corpo de prova. ....	71
Figura 39 - Centro de usinagem: (a) base portante; (b) montante monobloco móvel; (c) grupo operador; (d) prancha que suporta o cabeçote de trabalho; (e) ventosas de fixação das peças a serem usinadas e (f) unidade de operações e estruturação de programas.....	72
Figura 40 - Fresa de topo com três arestas de corte em hélice de metal duro, modelo HWM- Premium - Upcut Spiral Bit para acabamento.....	73
Figura 41 - (a) suporte adaptado para fixação dos corpos de prova; (b) colocação do corpo de prova no suporte; (c) corpo de prova pronto para ser usinado. ....	73

Figura 42 – Fluxograma dos ensaios de usinagem para cada rotação.....	75
Figura 43 – Corpo de prova usinado – fresamento tangencial.....	75
Figura 44 – Corpo de prova usinado – fresamento frontal.....	76
Figura 45- a) Rugosímetro Modelo SURTRONIC 25+; marca TAYLOR HOBSON. b) Haste de medição do Rugosímetro.....	76
Figura 46 - (a) computador para aquisição de dados; (b) módulo de canais; (c) placa de aquisição de dados e (d) tela do software LabView, com o sinal sendo coletado.....	77
Figura 47 - Microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO LS-15 .....	79
Figura 48 - Microscópio confocal e interferômetro Aixo Imager Z2m.....	79
Figura 49 - Interação Rugosidade (Ra) e parâmetros de corte (Vc, Va e ap).....	81
Figura 50 - Média da Rugosidade em relação aos parâmetros de corte. ....	83
Figura 51 - Valores médios das Rugosidades Ra para a profundidade de usinagem de 0,5 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial concordante. ....	87
Figura 52 - Valores médios das Rugosidades Rt para a profundidade de usinagem de 0,5 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial concordante. ....	87
Figura 53 - Valores médios das Rugosidades Ra para a profundidade de usinagem de 1 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial concordante. ....	88
Figura 54 - Valores médios das Rugosidades Ra para a profundidade de usinagem de 1 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial concordante. ....	89
Figura 55 - Valores médios das Rugosidades Ra para a profundidade de usinagem de 1,5 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial concordante. ....	90
Figura 56 - Valores médios das Rugosidades Rt para a profundidade de usinagem de 1,5 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial concordante. ....	90
Figura 57 - Valores médios das Rugosidades Ra para a profundidade de usinagem de 0,5 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial discordante. ....	92
Figura 58 - Valores médios das Rugosidades Rt para a profundidade de usinagem de 0,5 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial discordante. ....	93
Figura 59 - Valores médios das Rugosidades Ra para a profundidade de usinagem de 1 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial discordante. ....	94
Figura 60 - Valores médios das Rugosidades Rt para a profundidade de usinagem de 1 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial discordante. ....	94
Figura 61 - Valores médios das Rugosidades Ra para a profundidade de usinagem de 1,5 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial discordante. ....	95
Figura 62 - Valores médios das Rugosidades Rt para a profundidade de usinagem de 1,5 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial discordante. ....	96
Figura 63 - Valores médios das Rugosidades Ra para a profundidade de usinagem de 3 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento frontal.....	97
Figura 64 - Valores médios das Rugosidades Rt para a profundidade de usinagem de 3 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento frontal.....	98
Figura 65 - Valores médios das Rugosidades Ra para a profundidade de usinagem de 6 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento frontal.....	99
Figura 66 - Valores médios das Rugosidades Rt para a profundidade de usinagem de 6 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento frontal.....	99
Figura 67 - Valores médios das Rugosidades Ra para a profundidade de usinagem de 9 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento frontal.....	100
Figura 68 - Rugosidade média Ra das diferentes profundidades de usinagem (ap) para a velocidade de avanço 2 m/min no sentido concordante. ....	103
Figura 69 – Rugosidade média Ra das diferentes profundidades de usinagem (ap) para a velocidade de avanço 4 m/min no sentido concordante. ....	104
Figura 70 – Rugosidade Total Rt das diferentes profundidades de usinagem (ap) para a velocidade de avanço 4 m/min no sentido concordante. ....	104

Figura 71 - Rugosidade total $R_t$ das diferentes profundidades de usinagem ( $a_p$ ) para a velocidade de avanço 6 m/min no sentido concordante. ....	105
Figura 72 – Rugosidade média $R_a$ das diferentes profundidades de usinagem ( $a_p$ ) para a velocidade de avanço 2 m/min no sentido discordante. ....	107
Figura 73 – Rugosidade média $R_a$ das diferentes profundidades de usinagem ( $a_p$ ) para a velocidade de avanço 4 m/min no sentido discordante. ....	108
Figura 74 – Rugosidade média $R_a$ das diferentes profundidades de usinagem ( $a_p$ ) para a velocidade de avanço 2 m/min no sentido discordante. ....	109
Figura 75 – Rugosidade Total $R_t$ das diferentes profundidades de usinagem ( $a_p$ ) para a velocidade de avanço 2 m/min no sentido discordante. ....	110
Figura 76 – Rugosidade média $R_a$ das diferentes profundidades de usinagem ( $a_p$ ) para a velocidade de avanço 4 m/min no sentido discordante. ....	111
Figura 77 – Rugosidade Total $R_t$ das diferentes profundidades de usinagem ( $a_p$ ) para a velocidade de avanço 4 m/min no sentido discordante. ....	111
Figura 78 - Rugosidade média $R_a$ das diferentes profundidades de usinagem ( $a_p$ ) para a velocidade de avanço 6 m/min no sentido discordante. ....	112
Figura 79 – Potência para a velocidade de avanço na profundidade de usinagem de 0,5 mm. ....	114
Figura 80 – Potência para a velocidade de avanço na profundidade de usinagem de 1 mm. ....	115
Figura 81 – Potência para a velocidade de avanço na profundidade de usinagem de 1,5 mm. ....	116
Figura 82 – Potência para a profundidade de usinagem na velocidade de avanço de 2 m/min. ....	117
Figura 83 – Potência para a profundidade de usinagem na velocidade de avanço de 4 m/min. ....	117
Figura 84 – Potência para a profundidade de usinagem na velocidade de avanço de 6 m/min. ....	118
Figura 85 – Potência para a velocidade de avanço na profundidade de usinagem de 0,5 mm. ....	119
Figura 86 – Potência para a velocidade de avanço na profundidade de usinagem de 1 mm. ....	120
Figura 87 – Potência para a velocidade de avanço na profundidade de usinagem de 1,5 mm. ....	121
Figura 88 – Potência para a profundidade de usinagem na velocidade de avanço de 2 m/min. ....	122
Figura 89 – Potência para a profundidade de usinagem na velocidade de avanço de 4 m/min. ....	122
Figura 90 – Potência para a profundidade de usinagem na velocidade de avanço de 6 m/min. ....	123
Figura 91 - MEV referente ao ensaio de profundidade 1,5 mm e velocidade 2 m/min no sentido concordante. ....	125
Figura 92 - MEV referente ao ensaio de profundidade 1,5 mm e velocidade 2 m/min no sentido discordante. ....	126
Figura 93 - Imagem de MEV para MDF no sentido discordante com $V_c = 217$ m/min e $a_p = 1$ mm. ....	127
Figura 94 - MEV referente ao ensaio de profundidade 3 mm e velocidade 4 m/min no fresamento Frontal. ....	129
Figura 95 - MEV referente ao ensaio de profundidade 6 mm e velocidade 4 m/min no fresamento Frontal. ....	130
Figura 96 - MEV referente ao ensaio de profundidade 9 mm e velocidade 4 m/min no fresamento Frontal. ....	131
Figura 97 - Análise de MEV do MDF no fresamento frontal para $V_c = 1608$ m/min, $V_a = 10$ m/min e $a_p = 5$ mm. ....	132
Figura 98 - Topografia do fresamento frontal e concordante. ....	133

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Consumidores de MDF no Brasil em 2008.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Quadro 2 - Comprimento de amostragem (“cut-off”) recomendados para perfis de usinagem não periódicos.....	40
Quadro 3 - Valores dos parâmetros utilizados nos ensaios de usinagem.....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -- Valores médios referente a Rugosidade média (Ra) e a Rugosidade total (Rt) do fresamento tangencial no sentido concordante e discordante. ....	84
Tabela 2 -- Valores médios referente a Rugosidade média (Ra) e a Rugosidade total (Rt) do fresamento frontal. ....	85

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABIMCI	Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente
ABIPA	Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
BNDS	Banco Nacional de Desenvolvimento Social
CNC	Comando Numérico Computadorizado
EN	European Committee for Standardization.
FF	Fenol-formaldeído
IPI	Impostos sobre o Produto Industrializado
MDF	Medium density fiberboard
MUF	Melamina-ureia-formaldeído
NBR	Norma Brasileira Registrada
TF	Tanino- formaldeído
UF	Ureia-formaldeído
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura



## LISTA DE SÍMBOLOS

ap	Profundidade de usinagem	[mm]
i	Corrente alternada	[A]
I	Intensidade sonora de um som	[W.cm <sup>-2</sup> ]
le	Comprimento de amostragem (cut-off ou $\lambda_c$ )	[mm]
lm	Comprimento de medição	[mm]
ln	Comprimento para parada do apalpador	[mm]
lt	Comprimento total de medição	[mm]
lv	Comprimento para atingir a velocidade de medição do apalpador	[mm]
n	Rotação	[rpm]
Ra	Rugosidade média	[ $\mu$ m]
Rt	Rugosidade total	[ $\mu$ m]
U	Tensão	[V]
Ucc	Tensão de corrente contínua	[V]
Va	Velocidade de avanço	[m.min <sup>-1</sup> ]
Vc	Velocidade de corte	[m.min <sup>-1</sup> ]
W	Potência	[Watts]

## SUMARIO

1. INTRODUÇÃO .....	17
1.1 OBJETIVOS .....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 PAINEL DE MDF.....	19
2.1.1 Matéria Prima.....	21
2.1.2 Produção de MDF .....	22
2.1.3 Resinas .....	27
2.1.4 Características .....	28
2.2 USINAGEM.....	29
2.3 FRESAMENTO .....	30
2.3.1 Fresamento Concordante.....	33
2.3.2 Fresamento discordante.....	33
2.3.3 Movimentos entre a peça e a aresta cortante.....	34
2.3.4 Velocidade de corte, velocidade de avanço profundidade de usinagem. ....	36
2.3.5 Rugosidade.....	38
2.3.6 Fresamento da madeira.....	50
2.3.7 Comando numérico computadorizado (CNC).....	55
2.3.8 Ferramentas .....	60
2.3.9 Potência .....	63
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	66
3.1 MATERIAL .....	67
3.2 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE E DO TEOR DE UMIDADE DO MDF .....	69
3.2.1 Densidade.....	69
3.2.2 Teor de umidade.....	70
3.3 PROCEDIMENTOS DO ENSAIO DE USINAGEM.....	71
3.3.1 Usinagem.....	72
3.4 DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO MDF.....	76
3.5 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA CONSUMIDA .....	76
3.6 ANÁLISE DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL.....	78
3.6.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	78
3.6.2 Topografia das superfícies .....	79
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	80
4.1 ANÁLISE DO EFEITO DAS INTERAÇÕES DOS PARÂMETROS DE CORTE PARA A RUGOSIDADE (Ra).....	80

4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	83
4.2.1 Rugosidades no fresamento tangencial concordante e discordante e no fresamento frontal em relação às velocidades de corte e velocidades de avanço.....	86
4.2.1.1 Fresamento tangencial concordante .....	86
4.2.1.2 Fresamento tangencial Discordante.....	91
4.2.1.3 Fresamento Frontal.....	97
4.2.1.4 Discussões sobre a rugosidade em relação a velocidades de corte e velocidades de avanço. ....	101
4.2.2 Rugosidades para o fresamento tangencial concordante, discordante e fresamento frontal em relação a velocidades de corte e profundidade de usinagem. ....	102
4.2.2.1 Fresamento tangencial Concordante .....	102
4.2.2.2 Fresamento tangencial Discordante.....	106
4.2.2.3 Fresamento Frontal.....	109
4.2.2.4 Discussões sobre a rugosidade em relação a velocidades de corte e profundidade de usinagem. ....	112
4.2.3 Potência em relação a velocidades de corte, velocidades de avanço e profundidade de usinagem. ....	113
4.2.3.1 Potência no Fresamento Tangencial Concordante em relação a velocidade de avanço. ....	113
4.2.3.2 Potência no Fresamento Tangencial Concordante em relação a profundidade de usinagem. ....	116
4.2.3.3 Potência no Fresamento Tangencial Discordante em relação a velocidade de avanço a profundidade de usinagem. ....	118
4.2.3.4 Potência no Fresamento Tangencial Discordante em relação a profundidade de usinagem. ....	121
4.2.3.5 Discussões sobre o consumo de potência no Fresamento Tangencial Concordante e discordante em relação a velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de usinagem. ....	123
4.3 ANÁLISE DAS IMAGENS DA SUPERFÍCIE DO MDF NO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV). ....	124
4.3.1 Fresamento Tangencial Concordante e Discordante .....	124
4.4 ANÁLISES DAS IMAGENS DE TOPOGRAFIA DA SUPERFÍCIE.....	132
5. CONCLUSÕES.....	134
6. REFERENCIAS .....	135

## 1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material renovável no qual há um grande interesse em se trabalhar, não somente pelo ponto de vista econômico, mas também pela manutenção do equilíbrio ecológico que esses materiais podem proporcionar, além da influência no desenvolvimento social do país.

Na indústria madeireira o cenário é promissor para as madeiras de reflorestamento e principalmente para o painel de média densidade (Medium Density Fiberboard – MDF), pois este apresenta vantagens na substituição da madeira maciça que por sua vez está escassa e encarecida. 7,2 milhões de hectares no Brasil são destinadas a área de florestas plantadas de eucalipto, pinus, acácia, araucária, paricá e teca, nos quais 4% destina-se a produtos sólidos de madeira e 6% destina-se a painéis de madeira (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA -ABIPA, 2014).

Com o crescente consumo de matéria prima pelas indústrias de base florestal, é necessária a utilização de florestas plantadas que apresentam alta produtividade em período reduzido e com isso aumenta a procura pelo *Eucalyptus sp* e *Pinus sp* cita Lopes et al (2007).

As espécies de folhosas tropicais (Região Amazônica) ainda é a maior parcela expressiva da madeira serrada produzida no país. Porém as espécies de reflorestamentos possuem um volume considerável e têm crescido continuamente no Brasil, diz a Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI, 2009).

Segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF, em 2012 a área ocupada por plantios florestais de *Eucalyptus sp* e *Pinus sp* no Brasil totalizou 6.664.812 hectares, o que reafirma a contribuição da preservação dos recursos naturais, na economia, geração de produtos para consumo direto ou para exportação, criando impostos, e principalmente, empregos para a população.

A indústria de base florestal apresenta uma expansão tecnológica e evolui nitidamente em processos e produtos para diversas finalidades, tais como: construção civil, indústria moveleira, pisos e acabamentos entre outros. Um agravante para madeiras provenientes de florestas plantadas é a falta de conhecimento técnico dos processos, pois ainda há poucas pesquisas o que torna indispensável novas investigações, cita Martins (2011).

Na indústria madeireira o cenário é promissor para as madeiras de reflorestamento e principalmente para a indústria de painéis à base de madeira, como o MDF, pois este apresenta vantagens na substituição da madeira maciça que por sua vez está escassa e encarecida. 7,2 milhões de hectares no Brasil são destinadas a área de florestas plantadas de eucalipto, pinus,

acácia, araucária, paricá e teca, nos quais 4% destina-se a produtos sólidos de madeira e 6% destina-se a painéis de madeira (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA -ABIPA, 2014).

O MDF (painel de média densidade) é um produto industrial produzido a partir de fibras lignocelulósicas e resina através da ação conjunta de pressão e calor. É um material bastante empregado na indústria moveleira, pois apresenta homogeneidade, estabilidade dimensional e resistência mecânica próxima a madeira maciça. Recebe com facilidade diversos tipos de revestimentos mantendo a qualidade, além de responder positivamente a processos de usinagem. Essas qualidades são decisivas para a indústria de produtos sólidos à base de madeira, tais como indústria moveleira, construção civil, divisórias, pisos, portas entre outros.

É evidente o crescimento da demanda de produtos madeireiros industrializados e derivados, com isso se torna necessário a investigação de inovações tecnológicas. Com a tecnologia a indústria é capaz de oferecer produtos de melhor qualidade além de melhorar a competitividade no mercado. Dentre essas inovações destaca-se a usinagem, pois esse processo evolui notavelmente e dentro do setor madeireiro existem máquinas que proporcionam a automação dos processos produzindo melhores qualidades superficiais das peças usinadas.

A usinagem de painel MDF em centros de usinagem com comando numérico computadorizado (CNC) representa a tecnologia que alia material-máquina-ferramenta, no qual resulta em peças mais precisas e com acabamentos de qualidade. O MDF tem destaque entre painéis com fibras de madeira, pois apresenta distribuição homogênea das fibras em toda sua espessura o que permite a usinagem e resulta em superfícies menos grosseiras (MACHADO et al., 2009). O CNC otimiza os processos com qualidade, a automatização reflete principalmente na produtividade, característica na qual a indústria objetiva (TORQUATO, 2008).

Este trabalho inicia-se com a definição do MDF, seguidos das definições de usinagem, fresamento e comando numérico computadorizado (CNC) seguidos da revisão bibliográfica atual e relevante do assunto. No capítulo de materiais e métodos descreve-se o material, bem como os ensaios minuciosamente. No capítulo Resultados e Discussões compara-se o que há na literatura com os resultados encontrados neste estudo. Por fim, a conclusão e bibliografia utilizada.

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo investigar o processo de fresamento de MDF em centro de usinagem CNC através da análise da rugosidade superficial, do consumo de potência, da microscopia eletrônica de varredura e análise da topografia.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Observar a qualidade superficial por meio dos parâmetros de rugosidade através da rugosidade média (Ra) e Rugosidade total (Rt) medida de um rugosímetro.

Investigar o consumo da potência em tempo real em cada corte.

Analisar as imagens de topografia e as imagens do microscópio eletrônico de varredura (MEV).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PAINEL DE MDF

A madeira é um material renovável no qual há um grande interesse em se trabalhar, não somente pelo ponto de vista econômico, mas também pela manutenção do equilíbrio ecológico que esses materiais podem proporcionar, além da influência no desenvolvimento social do país.

Os indicadores econômicos relacionados ao setor de florestas plantadas no Brasil são extremamente importantes, segundo a ABIPA em 2013 a receita bruta totalizou R\$ 60 bilhões representando 6% do produto interno bruto (PIB) industrial. Este setor também é responsável por cerca de 5 milhões de empregos diretos e indiretos, o que representa aproximadamente 5% da população brasileira economicamente ativa (ABIPA, 2014).

Apesar do cenário promissor das madeiras de reflorestamento, o mercado de produtos compostos a base de madeira, em evidência o painel de MDF apresenta um crescimento animador na indústria devido as vantagens na substituição da madeira maciça que por sua vez está escassa e encarecida. A área de florestas plantadas de eucalipto, pinus, acácia, araucária, paricá e teca totaliza 7,2 milhões de hectares no Brasil, sendo que 4% é destinada a produtos sólidos de madeira e 6% destina-se a painéis de madeira (ABIPA, 2014).

Segundo a ABRAF (2013) nos últimos 10 anos a indústria de painéis de madeira apresentou-se em expansão, com aumento da produção anual de 3,1 milhões de toneladas para 7,3 milhões de toneladas totalizando 8,9% de crescimento médio anual.

O MDF (painel de média densidade) é um produto industrial produzido a partir de fibras lignocelulósicas e resina através da ação conjunta de pressão e calor. É um material bastante empregado na indústria moveleira, pois apresenta homogeneidade, estabilidade dimensional e resistência mecânica próxima a madeira maciça (DAVIM et al., 2009). Segundo a NBR 15316 (2006) o painel de fibras de media densidade são chapas com umidade inferior que 20% na linha da formação e densidade  $\geq 450 \text{ Kg/m}^3$ . Em Iwakiri (2005) diz que o MDF deve ter densidade média entre 0,50 a 0,80  $\text{g/cm}^3$  com estrutura homogênea de 3 a 60 mm de espessura e destina-se principalmente a produção de móveis.

O MDF recebe com facilidade diversos tipos de revestimentos mantendo a qualidade, além de responder positivamente a processos de usinagem. Essas qualidades são decisivas para a indústria de produtos sólidos à base de madeira, tais como indústria moveleira, divisórias entre outros (TORQUATO, 2008).

Segundo Campos (2004) a produção de painéis à base de madeira possui uma importância relevante para a economia, mas ainda há necessidade de investir em tecnologia. Os painéis surgiram para atender a escassez junto a proibição da utilização de madeiras nobres e também pelo custo das madeiras maciças.

Segundo Iwariki (2005) a isotropia do MDF aliada a distribuição homogênea das fibras confere a este material uma maior ligação interna e conseqüentemente alta resistência mecânica, resistência ao arranque de parafusos na face, além de facilitar a usinabilidade nas faces e na borda.

O MDF possui características relevantes para acabamentos internos como pisos, rodapés, batentes, guarnições e até portas. Todos os produtos citados exigem resistência mecânica e estabilidade dimensional aliadas a estética (acabamentos). Também é bastante utilizado na indústria moveleira, pois é capaz de produzir peças mais robustas e também as mais elaboradas; tais como gavetas, estantes e racks, nas quais tem um acabamento mais refinado (ABIPA, 2014).

Os painéis de MDF possuem características especiais devido às ligações internas e boas condições de usinabilidade e oferece um acabamento superficial adequado. (FERREIRA, 2010).

Segundo Kilic et al. (2006) na indústria moveleira é comum o revestimento do MDF com laminados para melhorar a estética, porém além dessa característica o laminado também melhora a resistência mecânica, resistências a produtos químicos domésticos, a riscos, a umidade e ao calor, características essenciais para um móvel.

Ferreira (2010) cita a variedade de tipos de MDF encontradas no mercado que diferenciam-se pela aplicação ou não de revestimentos, produtos acabados como rodapés e guarnições, mas o maior mercado consumidor de MDF no Brasil é a indústria moveleira.

A utilização do MDF na indústria moveleira apresenta crescimento devido aos incentivos governamentais que isentou os impostos sobre o produto industrializado (IPI) e desta forma elevou a competitividade no setor moveleiro em 2011. No mesmo sentido em 2012 a política do setor habitacional do Programa Minha Casa, Minha Vida também auxiliou a população na compra de mobiliário que também colaborou com o aumento da demanda de painéis industrializados (ABRAF, 2013).

### **2.1.1 Matéria Prima**

Segundo Torquato (2008) o produto final é influenciado pela escolha da matéria prima durante o processo de produção. A classificação vegetal coníferas e folhosas interferem o resultado, pois possuem fibras diferentes. Geralmente os painéis produzidos a partir de coníferas possuem características de coloração clara e densidade baixa devido a presença de fibras mais longas e as folhosas apresentam coloração mais escuras e presença de fibras mais curtas e espessas e por isso possui densidade mais altas. Deste modo, são mais requeridas para produção de chapas duras e painéis isolantes.

O MDF pode utilizar várias fontes de matérias prima tais como: serragem, cavacos, bagaço de cana de açúcar, palha de canola, palha de trigo, palha de soja e madeiras (FERREIRA, 2010). A indústria brasileira tem como principal fonte quase exclusiva as madeiras de reflorestamento de pinus no formato de toras, costaneiras, pontas, restos de laminação entre outros resíduos florestais. Isso ocorre devido a densidade média esperada para o MDF que é proveniente da densidade média das madeiras de pinus (IWAKIRI, 2005).

Belini (2007) comenta que entre 1997 até 2002 o Brasil utilizou exclusivamente pinus como matéria prima para a fabricação do MDF. Já de 2003 a 2006 o eucalipto esteve presente em até 23,1% da produção de MDF nacional. Atualmente a matéria prima relevante é o eucalipto devido ao tempo de crescimento em relação ao pinus.

A obtenção de partículas pode ser proveniente de várias fontes, porém no Brasil atualmente baseia-se exclusivamente da madeira de pinus com participação do eucalipto. E é cada vez mais promissor o mercado internacional para os painéis brasileiros devido a fabricação exclusiva de painéis de fibras de madeira de florestas plantadas (BELINI, 2007 e ABRAF, 2013).



Segundo ABRAF (2013) a produção de painéis industrializados tem aumentado e consomem 7,1% do das florestas plantadas. Apesar do crescimento promissor ainda há muito que crescer em comparação com outros segmentos, o consumo de celulose e serrados por exemplo é de 35,2% e 16,4%, respectivamente, pois a utilização dos painéis aumenta gradativamente.

O maior consumo de MDF é a indústria moveleira, porém é bastante utilizada em interiores de construções, molduras, paredes, batentes, rodapés entre outras aplicações que exigem boas características de acabamento (TORQUATO, 2008).

### **2.1.2 Produção de MDF**

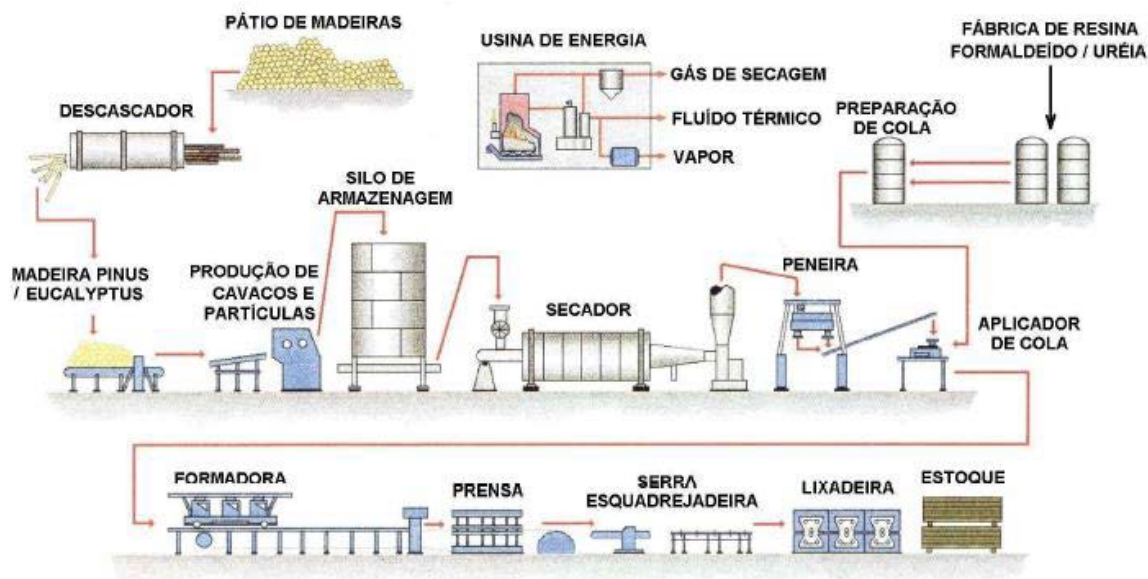
Os painéis de fibra de média densidade (MDF) foram inicialmente desenvolvidos na década de 60, porém somente na década de 90 que ocorreu crescimento de sua produção e comercialização. No Brasil, iniciou-se a produção em 1998 e hoje está entre os países que possuem as técnicas mais avançadas, com linhas contínuas modernas e versáteis do ramo (IWAKIRI, 2005 e ABIPA, 2014).

Segundo a ABIPA (2014) o consumo de painéis de madeira no Brasil destina-se principalmente a indústria moveleira e a construção civil, porém há consumidores para a revenda e pisos.

Segundo Iwakiri (2005) a produção de painéis de madeira envolve a etapa de obtenção de partículas que pode se diferenciar pelo tipo de método de equipamento utilizado, porém o processo mais utilizado é o termo-mecânico.

O processo de produção de painel de MDF desde a madeira até o acabamento está esquematizado na Figura 1. Inicia-se com o descascamento das toras e logo após a geração de cavacos que é feita através da transformação de toretes limpos e/ou elementos menores que cavacos que podem ser feitos em equipamentos como picadores. Em seguida, os cavacos são selecionados por peneiras para classificar e homogeneizar a matéria prima. Aqueles cavacos que não servem para o processo são destinados à biomassa. Os cavacos selecionados são destinados a lavagem para retirada das impurezas e então são encaminhados para o pré-tratamento para o desfibrilamento (MARINHO, 2012).

Figura 1 - Esquema ilustrativo do processo de produção de painéis MDF.



Fonte: Iwakiri (2005)

Os cavacos são pré aquecidos num digestor com presença de pressão e vapor com temperatura entre 170 a 180°C durante 2 a 5 minutos para separação dos componentes químicos da madeira - celulose e da lignina. Em seguida são enviados ao desfibrilador por um alimentador. Este processo de desfibrar os cavacos ocorre por um equipamento denominado “Asplund” que possui disco de 107 cm de diâmetro e rotação de 1500 rpm com capacidade de produção 75 a 200 toneladas/dia (IWAKIRI, 2005).

O processo termoquímico pode ter a presença de pressão ou não. Nesta fase, a madeira é levada a um digestor com sulfito, hidróxido de sódio ou cal, então a lignina passa do seu estado vítreo para o estado plástico, resultando em fibras mais resistentes e flexíveis e consequentemente painéis mais rígidos. Em seguida, ocorre a transformação em fibras através do cisalhamento mecânico ocasionado pelos discos ranhurados (MARINHO, 2012). Xing et al. (2007) cita que para aumentar a ligação interna, elasticidade e o modo de ruptura do MDF deve-se utilizar maiores valores de pressão e o menor tempo de retenção. Mohebbi et al. (2008) comenta que o processo de geração de fibras é determinante para as propriedades do painel.

Após esta etapa, é possível a aplicação de resinas em fluxo contínuo por aspersão ou por pulverização através de aplicador “Grenco” (Figura 2) para se obter fibras úmidas por vapor de água e resina. (MARINHO, 2012 e IWAKIRI, 2005).

Segundo Iwakiri (2005) as resinas ureia-formaldeído e a melamina-formaldeído são as mais utilizadas para os painéis de MDFs nas proporções de 8 a 10% e 5 a 10%, respectivamente. A melamina-formaldeído geralmente é adicionada para aumentar a resistência a umidade.

Ferreira (2010) comenta que o modo de aplicação e o tipo de resina influenciam a qualidade do MDF devido a homogeneidade na distribuição das fibras.

Figura 2 - Pulverizador de resina Gresco



Fonte: adaptado de BERNECK (2014).(<http://www.berneck.com.br/galeria-multimedia-detalhe.aspx?id=7>) acesso em 04/08/2014.

Após a aplicação da resina é realizada a secagem das fibras pela liberação da umidade através de um sistema pneumático de arraste e o controle da umidade é feito pelo volume e temperatura do material, esse processo é caracterizado pela rapidez, pois ocorre em segundos e é denominado de “flash”.

O processo segue para a formação do colchão de fibras que pode ser produzido através do processo seco. Em específico a produção de MDF utiliza o processo seco. O processo seco é caracterizado pela formação do colchão de fibras a partir de um dosador que a deposita sobre uma tela móvel com sucção. Os painéis são classificados com S-2-S com duas faces lisas, as etapas desse processo são descritas na Figura 3.

Segundo Torquato (2008) a formação do colchão de fibra ocorre por meio de uma dosagem constante de fibras sobre uma esteira de transporte onde ocorre a sucção da umidade para a união das fibras. O nivelamento das fibras é feito através do equalizador que é formado por cilindros dentados excluindo o excesso de material na esteira, ou seja, ocorre o aplainamento do colchão.

Figura 3 - Processo seco para obtenção de painéis MDF.



Fonte: Iwakiri (2005).

Na Figura 4 é possível observar a pré-prensagem que define o volume e a altura do colchão através da passagem dos cilindros sem aplicação de calor (IWAKIRI, 2005).

Figura 4 - MDF na pré prensa para homogeneizar a densidade.



Fonte: adaptado de BERNECK (2014).(<http://www.berneck.com.br/galeria-multimedia-detalhe.aspx?id=7>) acesso em 4/08/2014.

Segundo Iwakiri (2005) a prensagem ocorre na prensa continua com aplicação de pressão e temperatura, no geral esses equipamentos possuem comprimento superior a 26 metros e possuem rolos aquecidos que pressionam o material. O colchão passa inicialmente por aquecimento a alta frequência, no qual irá aquecer primeiro a parte interna do painel, assim o tempo na prensa é menor. Na metade da prensa o material é submetido a uma compactação até a espessura desejada além de acontecer a cura da resina. Ferreira (2010) comenta que esse processo é um dos processos que afetam a qualidade do painel.

Posteriormente, o painel segue para o corte e para o resfriamento (Figura 5), pois saem da prensa a 150°C. e por fim ocorre o corte e o acabamento, no qual o MDF passará por usinagem e lixamento (MARINHO, 2012).

Figura 5 - Etapa de resfriamento do MDF.



Fonte: adaptado de BERNECK (2014).(<http://www.berneck.com.br/galeria-multimedia-detalhe.aspx?id=7>) acesso em 4/08/2014.

O painel pronto poderá ser comercializado “in natura” ou com revestimentos superficiais, tais como laminados de baixa pressão (BP), laminados de alta pressão (fórmica), laminas de madeira ou finish foil com padrões madeirados, unicolors entre outros padrões decorativos (IWAKIRI, 2005).

### 2.1.3 Resinas

Segundo Iwakiri (2005) e Ferreira (2010) as resinas mais convencionais são ureia-formaldeído (UF), melamina-ureia-formaldeído, (MUF), tanino-formaldeído (TF) e fenol-formaldeído (FF).

O primeiro adesivo pensado para madeira foi a ureia-formaldeído (UF) que é um polímero sintético, composto principalmente por ureia e formaldeído presente em 70% dos produtos à base de madeira. Tem custo baixo, facilidade de manuseio, resistência a organismos vivos, abrasão, dureza, e propriedades térmicas favoráveis (FERREIRA, 2010 e FRIHART E HUNT, 2010).

Segundo Iwakiri (2005) possui coloração branca leitosa, É suscetível a degradação hidrolítica, por isso é mais utilizado em ambientes internos que não necessita da resistência a umidade. Sua cura ocorre por temperatura e pela adição de catalisadores. Possui durabilidade na fase líquida de 3 meses ou em pó de 1 ano.

Segundo Maffessoni (2012) Melamina-ureia-formaldeído, (MUF) é mais utilizada para laminados decorativos e cura rápida e tem como desvantagem o alto custo. É recomendada para utilização de fibras de matérias primas menos resistentes que a madeira (HALVARSSON et al., 2008). Segundo Iwakiri (2005) possui maior resistência a umidade em relação a UF. Tem cura rápida por temperatura (65° a 130°C) e pela adição de catalisadores. Possui durabilidade na fase líquida de 1 semana ou em pó de 1 ano. Sua maior desvantagem é o alto custo que chega a 3 vezes maior que a UF.

O tanino-formaldeído é composto pelo tanino retirado de fontes renováveis principalmente de plantas, casca de arvores entre outros. Tem como vantagem a estabilidade dimensional, propriedades mecânicas elevadas em comparação a painéis produzidos com outras resinas (GONÇALVES et al., 2008). Segundo Iwakiri (2005) possui baixa resistência a umidade e durabilidade em pó é de vida longa.

É comum a utilização de um baixo teor de parafina como aditivo, entre 1 a 3% da resina, afim de proporcionar o aumento da repelência a água nos painéis. Deste modo, ao diminuir a umidade pode melhorar a estabilidade dimensional e a resistência mecânica (BELINI, 2007).

O fenol-formaldeído (FF) é mais utilizado para produtos estruturais exteriores devido a maior resistência, principalmente a umidade (GONÇALVES, 2000). Segundo Iwakiri (2005) possui coloração marrom avermelhado, resistência mecânica elevada e resistência à umidade, por isso é destinada a produção de compensados /OSB/ aglomerados. Possui cura entre 130° a 150°C e um alto custo, quase três vezes maior que UF.

#### **2.1.4 Características**

Segundo a norma NBR 15316-1 (2006) a densidade é a característica representada pela relação da massa e o volume de um corpo em uma umidade determinada.

A densidade está relacionada a maioria das características que exigem qualidade e resistência, tais como aplicações estruturais e portas (TORQUATO,2008 e FERREIRA, 2010).

A principal vantagem do painel de MDF é a densidade que é considerada média, devido a isso apresenta estabilidade dimensional e a resistência mecânica de qualidade, características muito importantes em aplicações de mobiliário e interiores de construções. A partir da aplicação de aditivos, o MDF apresenta resistência ao fogo que é uma vantagem considerável, tendo em vista que as construções seguem normas de proteção contra incêndio (TORQUATO,2008).

Torquato (2008) caracterizou painéis de MDF do Brasil com o intuito de investigar a padronização dos painéis pelas indústrias nacionais, considerando produto e preço. Utilizou-se

três painéis de quatro empresas diferentes, porém todas possuem pinus e eucalipto como matéria prima. Os ensaios para caracterização foram baseados na norma EN 310 submetidos a flexão estática, densidade, retratibilidade e ligação interna. Conclui-se que a densidade não é afetada pelo teor de umidade. As densidades encontradas são homogêneas o que não ocorre na retratibilidade que demonstrou uma variabilidade entre as empresas. Os ensaios mecânicos demonstraram diferenças entre as empresas, mas de forma geral foram resistentes, ou seja, atendem aos requisitos exigidos pelas mais utilizadas EN 622-5 (2006).

Davim et al. (2009) estudou a influência dos parâmetros de velocidade de corte e velocidade de avanço através da rugosidade da superfície em MDF. A rugosidade da superfície diminui com um aumento de velocidade de corte e aumenta com a taxa de alimentação. O fresamento do MDF mostra a vantagem em se usar uma velocidade de corte elevada.

Ferreira (2010) avaliou a variabilidade técnica de utilização da resina ureia-formaldeído (UF) modificada com diferentes teores de tanino da casca de acácia negra. Além da utilização das propriedades físicas testou-se resinas convencionais como melamina-ureia-formaldeído, (MUF), tanino- formaldeído (TF) além de UF+tanino em proporções de 90-10%, 80-20%, 70-30%, 60-40%. Todas as resinas aliadas a 1 a 2 % de parafina totalizando 33 painéis. A variabilidade das resinas foi caracterizada através dos ensaios normatizados pela EN e NBR para a densidade, retratibilidade, resistência à tração perpendicular, resistência a parafusos e flexão estática. Por fim, os resultados demonstraram que as propriedades físicas e mecânicas dos painéis são diretamente influenciadas pela densidade. Os MDFs com UF em até 30% de tanino demonstraram resultados próximos a UF e MUF. A adição de parafina aumentou a resistência mecânica dos painéis. Portanto, os resultados mais satisfatórios das propriedades mecânicas dos painéis de MDF são referentes a presença da parafina aliada a UF+Tanino em até 30%.

Ayrimis (2010) fez uma investigação dos efeitos da superfície do MDF após a lixamento. Foram utilizadas 15 amostras com 2 tipos de lixa para cada amostra. Os parâmetros de rugosidade média da superfície do MDF com sensibilidade 0,5  $\mu\text{m}$  e cut-off 2,5 mm. As conclusões observadas são que a lixa de maior grão apresenta superfície mais homogênea. Para menores tamanhos de grão os valores de rugosidades se apresentaram menores, com mais aspereza.

## 2.2 USINAGEM



A tecnologia está aliada a necessidade da indústria em se obter materiais com qualidade em conjunto com custo baixo e alta produtividade. O crescimento da indústria madeireira exige inovações tecnológicas, porém com o material de anatomia peculiar como a madeira, exige também pesquisas para aumentar o conhecimento desses processos.

A usinagem é uma operação que visa à geração de dimensão, forma e acabamento ou a combinação dessas características em uma peça produzindo cavaco (FERRARESI, 1977). Segundo Machado et al. (2011) a remoção de material de uma peça através de outros materiais mais resistentes e duros é o mecanismo da usinagem.

Segundo Ferraresi (1977), 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.

A utilização da usinagem na madeira pode afetar a vida da ferramenta, a produtividade e a qualidade de peça. Deste modo, é importante conhecer as propriedades físicas e anatômicas para correta utilização (LUCAS FILHO, 2004).

Zamarian et al. (2012) comentam que a utilização de uma técnica de usinagem adequada para a transformação da madeira pode minimizar e até corrigir problemas decorrentes de sua variabilidade.

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.

Através da tecnologia nos processos de peças usinadas, cada dia se torna mais possível obter um acabamento de qualidade em materiais considerados de difícil usinabilidade. Os processos podem ser manuais ou automáticos, tal como com comando numérico computadorizado - CNC (MACHADO et al., 2009).

Os processos de usinagem mais citados são o de torneamento e fresamento. Existem vários processos de usinagem convencionais tais como: furação, aplainamento, mandrilhamento, serramento, brochamento, roscamento, retificação, fresamento entre outros. Além de processos mais atuais como o ultra som, laser, plasma, fluxo abrasivo, eletrolíticas entre outros (SANTOS E SALES, 2007).

### 2.3 FRESAMENTO

Ferraresi (1977) destaca que 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.

Diniz, Marcondes e Coppini (2013) definem fresamento por um processo de usinagem que utiliza de ferramenta fixa a um eixo com arestas cortantes. Rigatti (2010) descreve o fresamento como a remoção de cavaco que provoca uma forma na peça com dimensões e acabamento específico.

O fresamento é um método de usinagem muito utilizado na indústria moveleira em operações envolvendo máquinas como plainas, tupias, desgrossadeiras. Sen et al. (2013) comentam que o fresamento é frequentemente utilizado na indústria da transformação. Com a tecnologia houve progressos no procedimento, porém ainda há o que melhorar.

É cada vez mais necessária uma usinagem programada capaz de gerar superfícies adequadas aos revestimentos, propiciando mínimo de desperdício e o máximo rendimento.

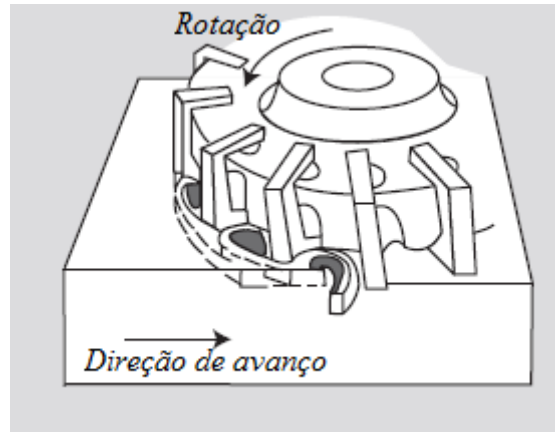
Diniz, Coppini e Marcondes (2013) descrevem as principais características da usinagem por fresamento: a fresa constitui arestas simétricas dispostas em torno de um eixo; a rotação da fresa ao redor do seu eixo proporciona movimento de corte; a peça em usinagem que esta fixa na mesa proporciona o movimento de avanço, pois passa sob a ferramenta em rotação confeccionando forma e dimensão.

Em Ferraresi (1977) são descritos os diferentes fresamentos básicos segundo a trajetória da ferramenta: o fresamento tangencial e o 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, COPPINI E MARCONDES, 2013).

Para Ferraresi (1977) a obtenção de uma superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta, como mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Fresamento frontal

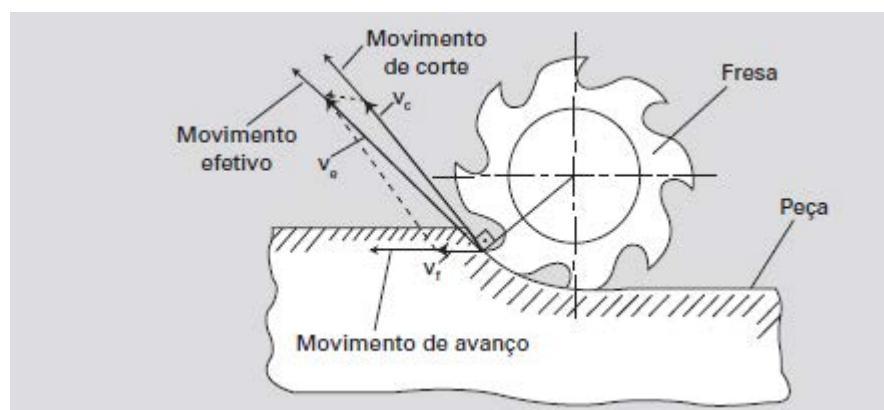


FONTE: adaptado de Machado et al, (2009).

Para Maia (2009) o fresamento tangencial é descrito por uma operação na qual a superfície originada na peça se encontra paralela ao eixo de rotação da ferramenta. Esse processo é obtido a partir de fresas cilíndricas ou tangenciais.

É considerado fresamento tangencial se o eixo de rotação da ferramenta estiver inclinado em relação a superfície originada na peça, segundo Ferraresi (1997). Assim como para Diniz, Coppini e Marcondes (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, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Fresamento Tangencial



FONTE: adaptado de Machado et al, (2009).

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. Uma

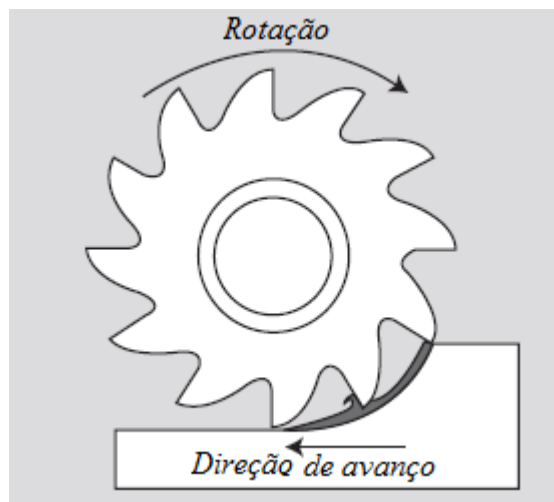
característica relevante das operações descritas é a formação de cavaco em forma de vírgula (DINIZ, COPPINI E MARCONDES, 2013).

### 2.3.1 Fresamento Concordante

O fresamento concordante ocorre quando o sentido do movimento de avanço é equivalente ao movimento da fresa, ou seja, a peça usinada é empurrada em direção à mesa, Figura 8. Esse corte se inicia com um ângulo máximo e ao fim do corte de uma aresta decresce até o valor zero. O movimento da ferramenta é equivalente à mesa e a espessura do corte varia de um valor máximo até zero (DINIZ, COPPINI E MARCONDES, 2013).

Rossi (2005) cita que o fresamento concordante (down milling) deve ser evitado quando a superfície do material usinado apresentar grande irregularidade tais como resíduos com aspecto de areia. Deste modo, não haverá qualidade favorável na rugosidade superficial.

Figura 8 - Fresamento concordante



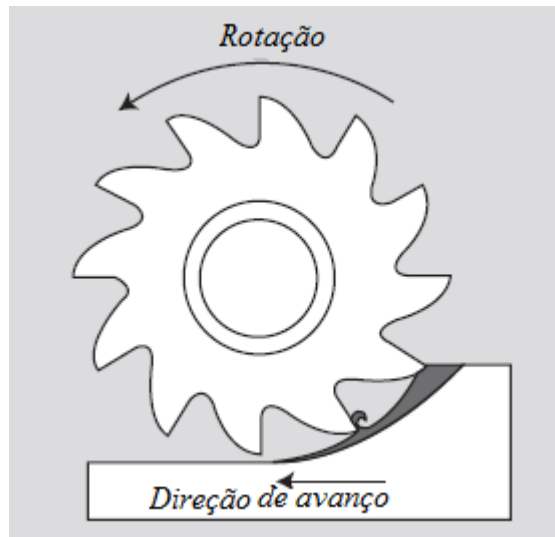
FONTE: adaptado de Machado et al, (2009).

### 2.3.2 Fresamento discordante

O fresamento discordante consiste no sentido do movimento de avanço ser contrário ao movimento da fresa. O movimento da fresa faz com que a ferramenta movimente a peça (Figura 9). Segundo Ferraresi (1977), esse corte se inicia com um ângulo zero e ao fim do corte de uma aresta atinge o valor máximo.

Segundo Diniz, Coppini e Marcondes (2013) durante o processo o toque entre a aresta e a peça provoca um atrito e conseqüentemente uma deformação plástica sem a formação de cavacos. Essa pressão faz com que a ferramenta penetre na peça retirando material em forma de vírgula.

Figura 9 - Fresamento Discordante.



FONTE: adaptado de Machado et al, (2009).

### 2.3.3 Movimentos entre a peça e a aresta cortante

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. A partir desses parâmetros é possível usufruir do processo do fresamento de forma mais produtiva e maior qualidade.

Os movimentos entre a peça, a aresta cortante e a peça estacionária são relativos no fresamento (MACHADO, 2009). O fresamento ocorre entre diferentes movimentos que podem causar a saída direta de cavaco e movimentos que não participam da formação de cavaco, segundo Ferraresi (1977).

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). 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. 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 parâmetros de corte que influenciam a qualidade superficial devem ser compreendidos conforme cada necessidade, principalmente relacionada a madeira (PINHEIRO, 2014).

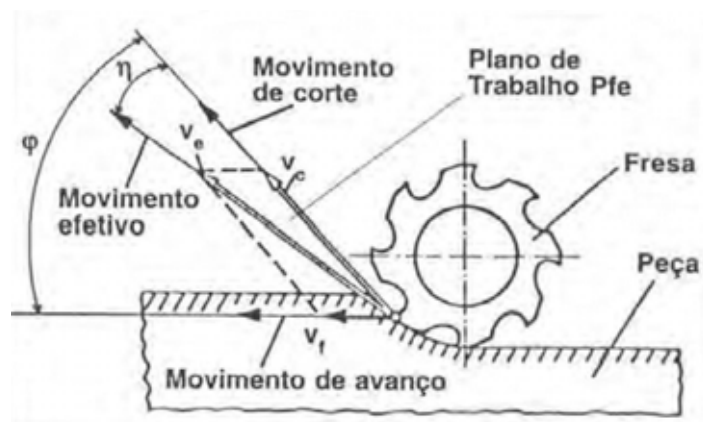
Para o estudo da usinagem deve se definir as grandezas relacionadas, tais como: velocidade do corte, direção do corte, velocidade de avanço, direção de avanço e profundidade de usinagem entre outros (MACHADO, 2009).

O movimento de corte é o movimento entre a peça e a ferramenta, que ocasiona, sem o movimento de avanço, uma única remoção de cavaco durante um percurso. Rossi (2005) cita que o movimento do corte ocasiona um movimento relativo à face da ferramenta. 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, COPPINI E MARCONDES, 2013).

Diniz, Coppini e Marcondes (2013) e Ferraresi (1977) 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  $\beta$  (Figura 10).

A velocidade instantânea do ponto da aresta cortante, segundo a direção efetiva do corte é denominada velocidade efetiva (FERRARESI, 1977). Essa velocidade é resultante da velocidade de corte e de avanço (ROSSI et al., 2005).

Figura 10 - Ângulos no fresamento



Fonte: Gonçalves (2000).

### 2.3.4 Velocidade de corte, velocidade de avanço profundidade de usinagem.

Machado et al. (2009) e Ferraresi (1977) 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 é calculada através da Equação (2.1)

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \text{ (m/min)} \quad (2.1)$$

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) dizem 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. Na ausência do avanço este movimento ocasiona apenas uma retirada de cavaco (MACHADO et al, 2009).

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 aresta de corte, que em conjunto com o movimento de corte propicia a formação de superfícies usinadas com forma previamente determinada (ABNT NBR ISO 3002-1, 2013).

Esse parâmetro depende da ferramenta, da peça e está ligado diretamente ao acabamento da superfície e a potência da máquina (WRUBLACK et al., 2008).

A velocidade de avanço ( $V_a$ ) é dada pela Equação (2.2).

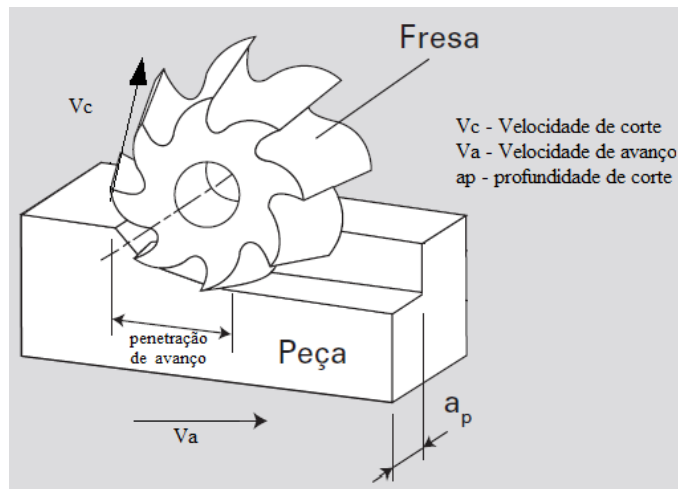
$$V_a = n \cdot f_z \cdot Z \text{ (mm/min)} \quad (2.2)$$

Onde  $f_z$  = avanço por dente (mm),  $Z$  = número de dentes e  $n$  = números de rotações por minuto (rpm), com unidade de milímetros por minuto.

As velocidades de corte e de avanço mais adequadas são relativas a usinagem programada, do tipo de material da ferramenta e da peça (MACHADO et al., 2009).

As velocidades de avanço e de corte podem ser observadas no sentido discordante na Figura 11.

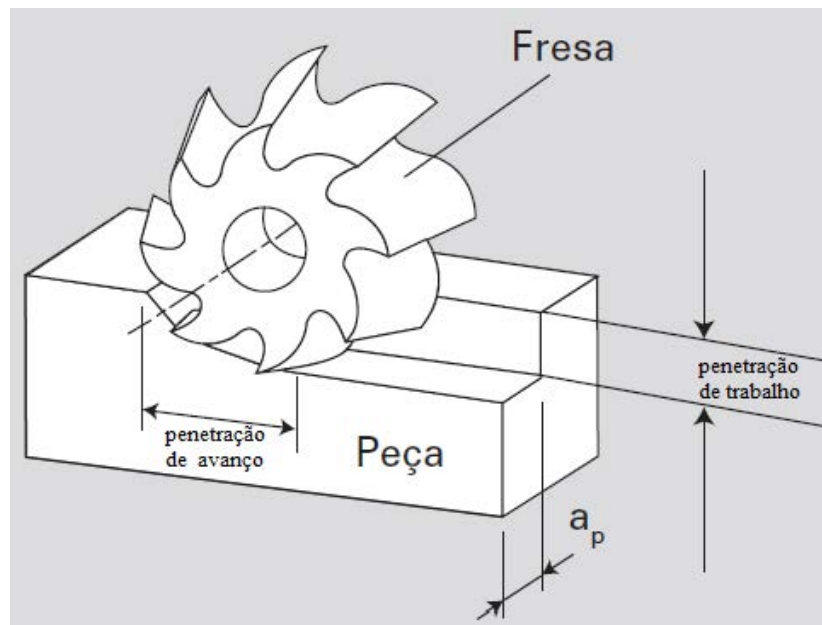
Figura 11 -- Velocidade de corte, Velocidade de avanço e Profundidade de usinagem.



(FONTE: Machado et al., 2009).

A largura de usinagem e a penetração de trabalho ( $a_e$ ), medida no plano de trabalho e em uma direção perpendicular à direção de avanço. Essa penetração ( $a_p$ ) é sempre perpendicular ao plano de corte, no qual se encontra a direção de avanço e de corte, como ilustra Figura 12.

Figura 12 – Largura de usinagem ( $a_p$ ).



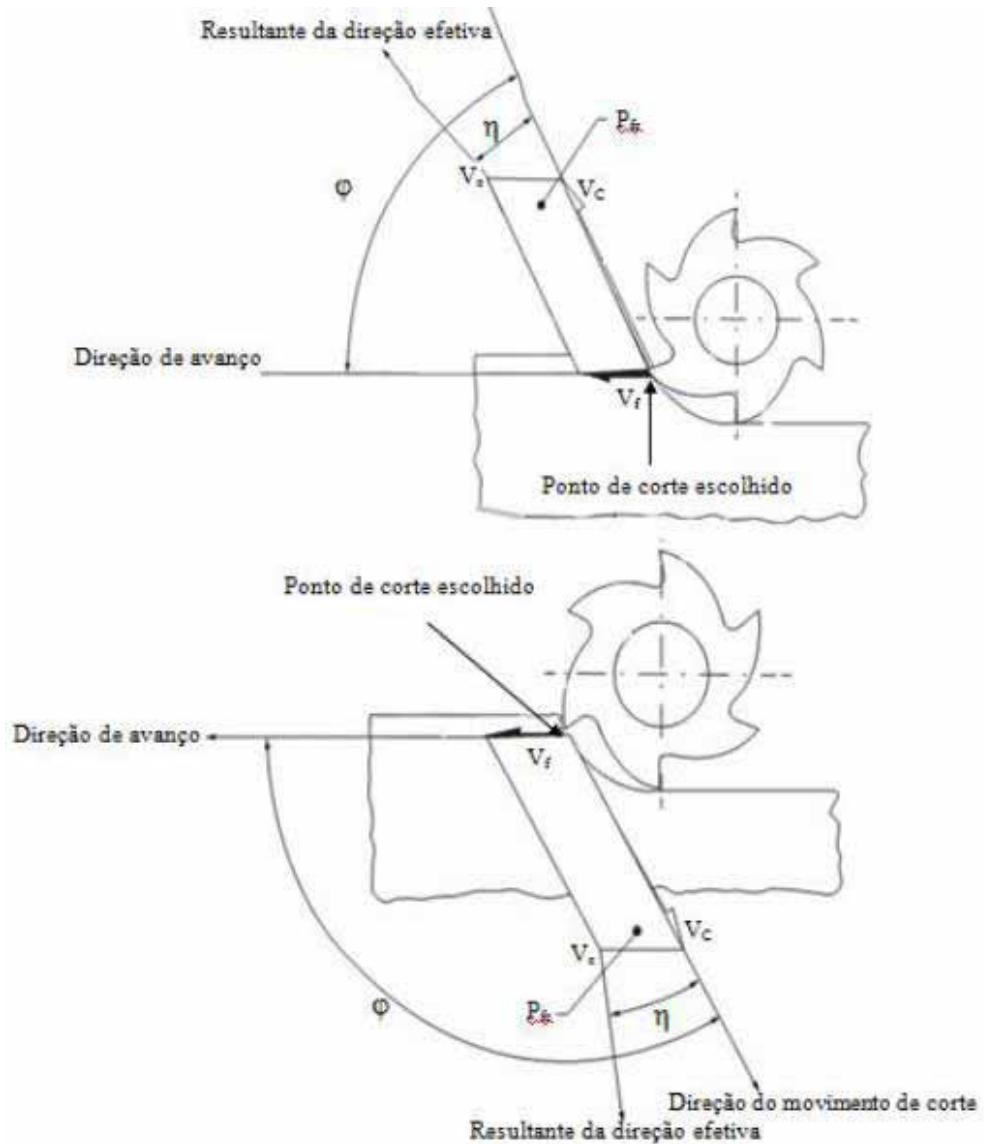
(FONTE: Machado et al., 2009).

Os movimentos dos processos de usinagem envolvem a peça e a aresta cortante além da peça estacionária e todas são relativas. A direção e os sentidos de corte aliados aos movimentos da peça e da ferramenta se relacionam para obtenção de cavaco (MACHADO et al. 2009).



Na usinagem por fresamento os conceitos relacionados a direção, velocidade e ângulo são definidos pela norma ABNT NBR ISO 3002-1 (2013) como é possível observar na Figura 13.

Figura 13 – Movimentos, direções e velocidades da ferramenta e da peça.



(Fonte: NORMA ABNT NBR ISO 3002-1,2013)

### 2.3.5 Rugosidade

Kilic et al. (2006) comentam que a qualidade da superfície de materiais sólidos é uma propriedade relevante que influencia a aplicação de cola e revestimentos.

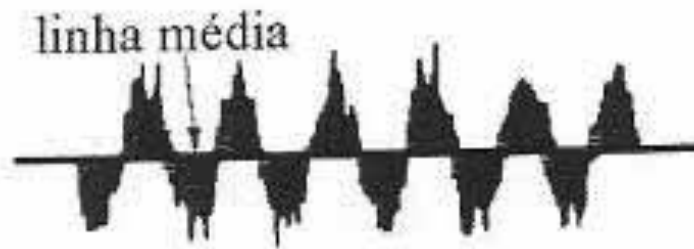
A rugosidade é formada por marcas provocadas pela ferramenta que passou sobre a superfície da peça durante o processo de usinagem provocando ondulações, que podem ser provocadas vibrações, flexões da ferramenta e também pela força da usinagem. A irregularidade

da superfície usinada é caracterizada como rugosidade. Deste modo, o acabamento superficial é um parâmetro importante de avaliação da qualidade de peças usinadas (MACHADO et al., 2011).

Segundo Pinheiro (2014) o acabamento superficial é o resultado da ação conjunta de algumas variáveis, tais como: parâmetros de corte, desenho construtivo, geometria de corte e condições da máquina. O fresamento está suscetível a erros em sua forma e posição.

Para mensurar a superfície da madeira são vários equipamentos que diferenciam-se no grau de precisão na definição dessa rugosidade (GOLI et al., 1997). O rugosímetro é o aparelho capaz de medir textura superficial, essa medida da rugosidade superficial é baseada na linha média que secciona o perfil de tal modo que as áreas localizadas acima e abaixo são mínimas e equivalentes, como mostrado na Figura 14 (NOVASKI, 2013).

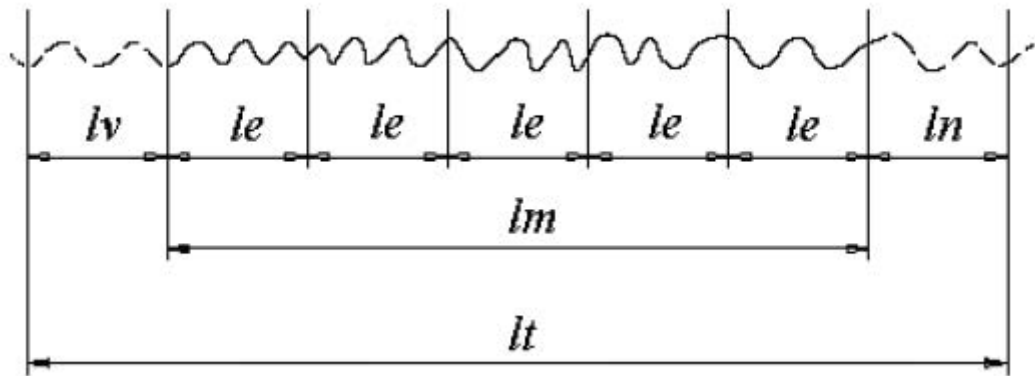
Figura 14 – Linha média e áreas mínimas superior e inferior.



Fonte: ABNT - NBR 6405 (1988).

A norma ABNT 6405 (1988) apresenta critérios para avaliar a qualidade superficial. O comprimento da amostragem ( $l_e$ ) é responsável por filtrar a ondulação e são chamados de *cut-off*, o rugosímetro deve medir cinco comprimentos de amostragem ( $l_m$ ) e retirar a média, como ilustra a Figura 15.

Figura 15 - Comprimentos para a avaliação de rugosidade.



Fonte: ABNT - NBR 6405 (1988).

No qual  $l_m$  é o comprimento de percurso de medição,  $l_e$  é o comprimento total de medição (*cut-off*),  $l_v$  comprimento para atingir a velocidade de medição,  $l_n$  comprimento para parada do apalpador extensão da primeira e última parte do trecho na avaliação. A escolha do *cut-off* deve estar de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4288 (2008) seguindo o Quadro 1, que mostra os valores limites de *cut-off* padronizados.

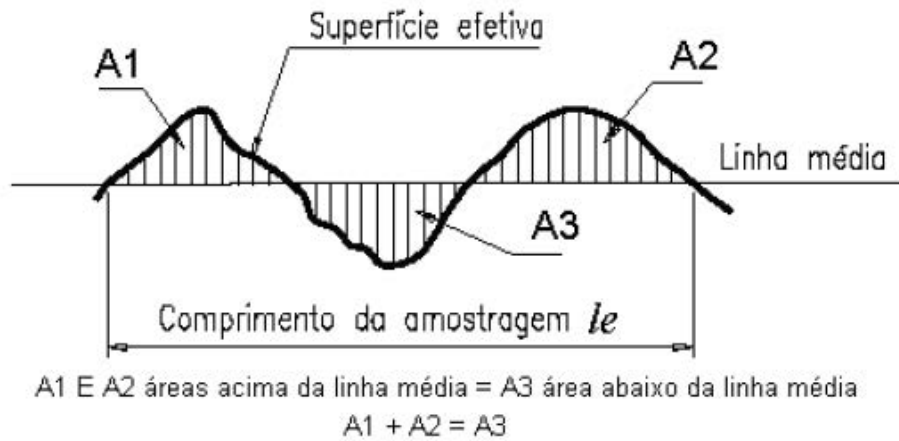
Quadro 1 - Comprimento de amostragem (“cut-off”) recomendados para perfis de usinagem não periódicos.

Rugosidade Média ( $\mu\text{m}$ )	Mínimo comprimento ( $l_e$ ) <i>cut-off</i> (mm)
De 0 até 0,1	0,25
Maior que 0,1 até 2,0	0,8
Maior que 2,0 até 10,0	2,5
Maior que 10,0	8

Fonte: adaptado da (ABNT – NBR ISO 4288 (2008))

Os sistemas básicos de medida da rugosidade superficial citados nas Normas ABNT NBR 6405 (1988) e NBR 8404 (1984) são divididos em dois sendo o primeiro da linha média M o mais utilizado e o da envolvente. A linha média é a linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento da amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores no comprimento da amostragem ( $l_e$ ), como ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Sistema da linha média.

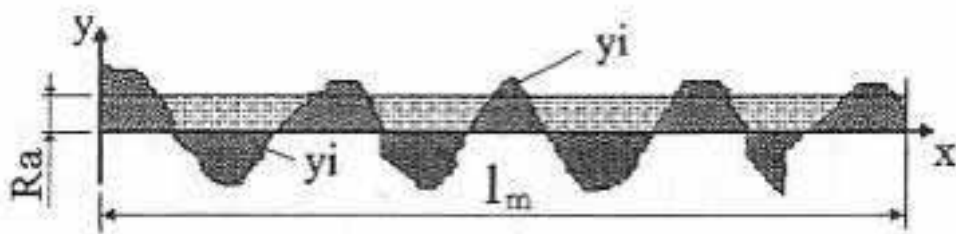


Fonte: adaptado da (ABNT – NBR ISO 4288 (2008))

Segundo Barros (2013) para a medição da rugosidade média representado pelo parâmetro  $R_a$ , que é definida pela amplitude média do perfil em relação à linha de referência sobre determinado comprimento do perfil correspondente a cada comprimento amostral considerado. Esse é o parâmetro de avaliação da rugosidade superficial como mostra a Equação 2.3:

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} |y(x)| dx \quad (2.3)$$

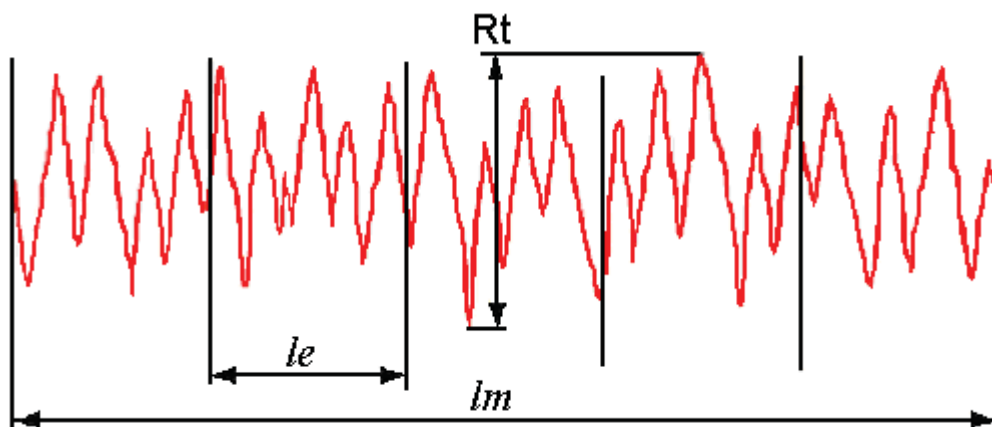
No qual  $R_a$  é a rugosidade média,  $l_m$  é o percurso da medição,  $y(x)$  é a função das ordenadas do afastamento, como mostra a Figura 17.

Figura 17 –Rugosidade média  $R_a$ 

Fonte: ABNT - NBR 6405 (1988).

A Rugosidade Total ( $R_t$ ) é o parâmetro que define a altura máxima de um pico medido a um vale de percurso de medição ( $l_m$ ), ou seja a amplitude entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação, como ilustra Figura 18.

Figura 18 - Rugosidade Total



Fonte: De Conti (2011).

A superfície irregular após a usinagem reduz a qualidade do produto final, essa característica é definida através da medição da rugosidade das peças de painéis de MDF. Deste modo, é possível quantificar a qualidade superficial e melhorar o processo de usinagem, com velocidade de corte, velocidade de avanço, potência entre outros.

Um estudo com peças dúcteis realizado por Balachandran e Zhao (2000) investigaram a estabilidade no fresamento em relação à velocidade de corte e profundidade de usinagem. Prever esse comportamento pode evitar trepidações e afastamento que influenciam a superfície dos materiais. Concluiu que parâmetros velocidade de corte e profundidade de usinagem apresentam áreas de instabilidade em diferentes rotações.

Chen et al. (2012) destacam a importância da superfície de alta qualidade na usinagem, pois pode influenciar o custo do produto final na indústria, principalmente para materiais de alta durabilidade. Deste modo, as operações de fresamento são quase imprescindíveis, consumindo boa parte do tempo de processos e tendo impacto significativo sobre a qualidade de acabamento superficial e sobre custos do produto final.

A rugosidade é afetada pela velocidade de corte, profundidade de usinagem, condições da ferramenta e da peça. Na investigação de Chen et al. (2012) com o aumento dos números de rotações e a diminuição da profundidade de usinagem ocorre a diminuição da rugosidade.

A indústria exige melhoria das condições de corte e mais investimento tecnológico de usinagem, a fim de diminuir perdas e aumentar a qualidade. No trabalho de Shen et al. (2012) a rugosidade das superfícies usinadas demonstraram melhores resultados para maiores velocidades de corte.

Em Zamarin et al. (2012) investigou-se a usinagem de bracatinga (*Mimosa scabrella*) para uso na indústria moveleira e obteve-se aproveitamento de 92%, porém destaca-se a importância do conhecimento da madeira durante a usinagem para uma correta utilização da peça.

Em Souza et al. (2009) foram utilizadas *Eucalyptus urophylla* e *E. camadulenses* de 6 a 8 anos em sistema agrosilvipastoril. As peças foram ensaiadas nos planos paralelo e transversal no aplainamento, fresagem e furação. A madeira analisada apresentou comportamento adequado na indústria moveleira, porém a idade influenciou nos resultados. Quanto maior a idade da madeira menos favoráveis os resultados de acabamento.

Em 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 fz) das amostras, aumenta-se o valor da rugosidade média “Ra” em 4%. Tiburcio (2009) 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.

Em Teixeira (2011) foi proposto ensaios de usinagem com mogno africano (*Khaya evorensis* A. Chev) para avaliação superficial das peças com diferentes velocidades, diferentes parâmetros de corte analisadas através da rugosidade. Os resultados para qualidade superficial demonstram que a velocidade de avanço menor gera menos defeitos

Laszewicz et al. (2013) descreveram um novo controle adaptativo no sistema correspondente a progressão de desgaste da ferramenta para medir as dimensões das peças. Deste modo, seria possível uma precisão do processo de fresagem do MDF. Constatou-se que os erros de corte reais observadas nos painéis MDF para fresamento lateral não eram nem igual nem mesmo estritamente proporcional aos erros que seria de esperar, ou explicável, apenas na diminuição real do diâmetro da fresa.

Davim et al. (2009) estudaram a influência dos parâmetros de velocidade de corte e velocidade de avanço através da rugosidade da superfície em MDF. A rugosidade da superfície

diminui com um aumento de velocidade do fuso e aumenta com a taxa de alimentação. O fresamento do MDF mostra a vantagem de usar uma velocidade de corte elevada.

Em Martins et al. (2011) lixou-se e aplainou-se o *Eucalyptus benthamii* no sentido transversal. Os perfis das superfícies aplainadas apresentaram rugosidades mais profundas e a extensão foram maiores, ou seja, plaina produziu superfícies com células abertas e vasos. A superfície somente lixada teve incidência maiores de picos e vales menores, o que corresponde às ranhuras da lixa. Na análise estatística não apresentou nenhuma diferença significativa entre a superfície aplainada e lixada. Porém maiores desvios padrões em todos os parâmetros da plaina. Observa-se que na superfície lixada houve fibrilações que para adesivos oferecem melhores condições de espalhamento. Os vasos ficam evidentes na superfície aplainada, o que promove maior penetração de adesivo. Conclui-se que não há diferença significativa do processo de lixa e plaina.

Em Braga et al. (2014) investigou-se a melhor velocidade de corte durante a usinagem de madeira *coffea arábica* tendo como qualidade da superfície. Utilizou-se as rotações 2400, 3600 e 4000 rpm, velocidades de corte respectivamente correspondem a 12,57; 18,85 e 20,94 m/s e velocidade de avanço de 6 m/min. Os resultados demonstram que a qualidade da superfície usinada com as velocidades de corte de 18,85 e 20,57 m/s foi considerada satisfatória com pequenos levantamentos de fibras e baixos valores de avanço por dente e de rugosidade Ra.

Salje (1985) mediu a rugosidade de aglomerados e concluiu que a qualidade superficial sofreu mais influência do parâmetro avanço por dente do que da velocidade de corte e da profundidade de usinagem.

Ueda et al. (2001) investigaram a temperatura sobre a ferramenta em relação a velocidade de corte, profundidade de usinagem e velocidade de avanço. Observou-se que as maiores interferências na ferramenta e na peça ocorrem inicialmente pela velocidade de corte, seguida da velocidade de avanço e por fim profundidade de usinagem. O mesmo foi observado por Dimla (2004) que investigou o desgaste de ferramenta nas condições de corte no torneamento de aço, utilizou seis diferentes profundidades de usinagem e concluiu que a velocidade de corte e a velocidade de avanço apresentam variações importantes diferentes da profundidade de usinagem. Quando aumenta a profundidade de usinagem geralmente aumenta a força de corte, ocorre uma tendência ascendente.

Eyma et al. (2004) realizaram o fresamento periférico paralelo CNC com 14 espécies exóticas para experimentar um método estatístico de correlacionar as propriedades mecânicas, densidade e usinagem. As madeiras foram solicitadas ao fresamento normal e tangencial e as medidas de corte foram medidas através de um piezoelétrico e um dinamômetro. Os

parâmetros de corte foram fixos com velocidade de avanço 4 m/min e profundidade de usinagem de 4 mm, resultando em 30 valores resultantes totais. Observou-se que o módulo de elasticidade da madeira é diretamente relacionada a qualidade final da usinagem. Na correlação preliminar observou-se que os resultados são significativos para relação usinagem e densidade.

Silva et al. (2005) observaram as variações medula-casca em diferentes operações de usinagem no *Eucalyptus grandis*. As amostras foram confeccionadas em discos e analisadas em três pontos; mais externo, intermediário e o interno. Assim foram levadas ao fresamento axial e transversal. Mesmo os resultados demonstrando que o *E. grandis* possui rugosidade inferiores do mogno e da imbuia, pode-se considerar este eucalipto de qualidade. Observou-se que para as velocidades de avanço estão relacionadas a superfícies com qualidade em ordem decrescente. Destaca-se a importância da influência da velocidade de corte, mesmo com menor contribuição para os resultados da rugosidade da madeira foi considerada adequada. Deste modo, com o melhoramento dos parâmetros de usinagem, conseqüentemente melhora a qualidade superficial.

Rossi et al. (2005) estudaram as relações entre os parâmetros de corte e a rugosidade de metais através do fresamento. Verificou-se que o parâmetro de corte que mais influenciou a rugosidade foi a velocidade de avanço, seguido da rotação do fuso e por fim a profundidade de usinagem foi a que menos influenciou. Na Figura 19 observa-se que foram utilizadas duas rotações (n) 224 e 710 rpm, para duas velocidades de avanço (f) 25 e 78 mm/min e duas profundidades de usinagem (ap) 1 mm e 6 mm.

Figura 19 – Parâmetros de corte para a rugosidade superficial.

Ensaio	Fresa	Fatores	f (mm/min)	n (rpm)	ap (mm)	Ra1 ( $\mu\text{m}$ )	Ra2 ( $\mu\text{m}$ )	Ra3 ( $\mu\text{m}$ )	Ram ( $\mu\text{m}$ )
1	1	(1)	25	224	1	1,12	1,16	1,04	1,11
2	2	c	25	224	6	1,52	1,20	1,32	1,35
3	3	b	25	710	1	0,78	1,26	0,74	0,93
4	4	bc	25	710	6	1,48	1,50	1,38	1,45
5	5	a	78	224	1	4,84	4,62	5,24	4,90
6	6	ac	78	224	6	2,96	2,48	2,28	2,57
7	7	ab	78	710	1	1,92	1,70	2,16	1,93
8	8	abc	78	710	6	1,64	1,64	1,64	1,64
9	8	(1)	25	224	1	1,14	1,04	1,02	1,07
10	7	c	25	224	6	1,10	1,48	1,30	1,29
11	6	b	25	710	1	1,14	1,18	1,28	1,20
12	5	bc	25	710	6	1,70	1,48	1,46	1,55
13	4	a	78	224	1	2,74	2,78	2,72	2,75
14	3	ac	78	224	6	2,74	2,56	3,02	2,77
15	2	ab	78	710	1	1,06	1,32	1,04	1,14
16	1	abc	78	710	6	2,52	2,86	2,70	2,69

Fonte: Rossi et al. (2005)



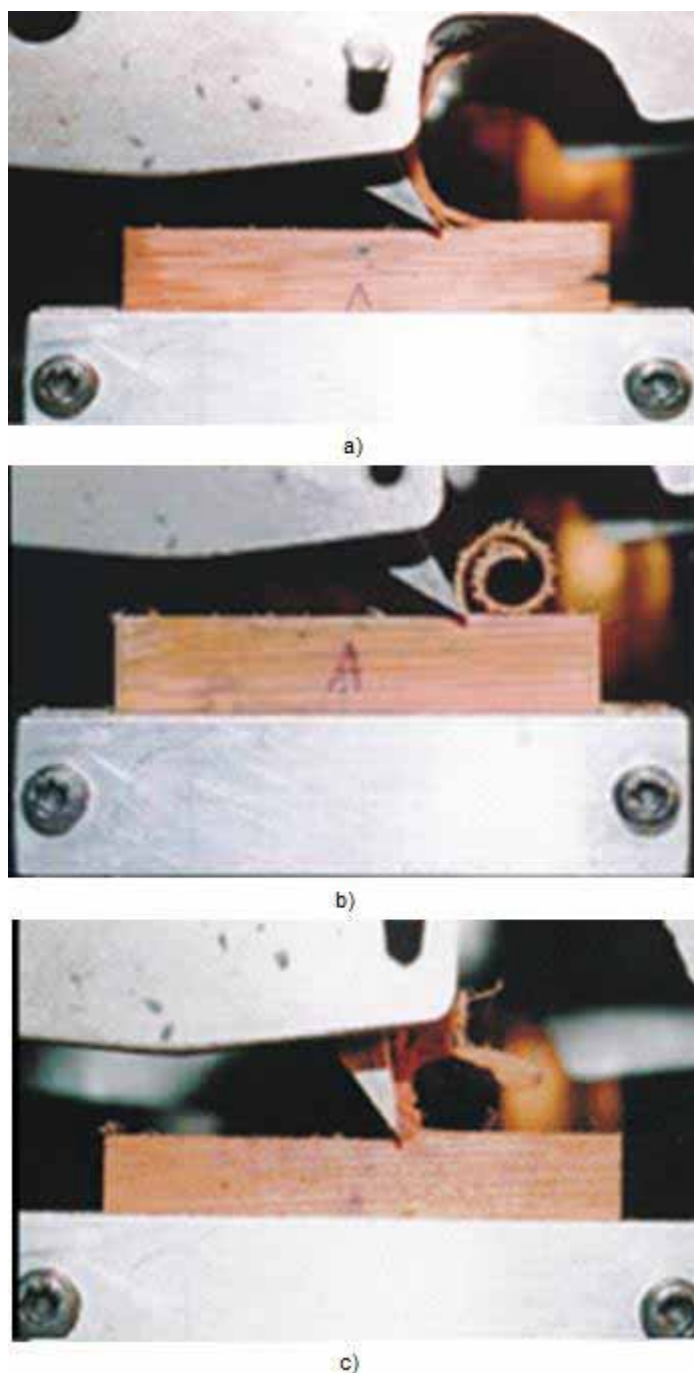
Observa-se também na Figura 19 que os valores de rugosidade são maiores na maior profundidade de usinagem 6 mm, ou seja, na profundidade de 1 mm para todas as rotações e velocidades de avanço apresentaram menores rugosidade superficial.

Gonçalves e Neri (2005) analisaram as diferenças na força de corte na madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* e *Eucalyptus*. As medidas foram retiradas através de um anel dinamômetro em três componentes paralela, normal e lateral. Os ensaios foram realizados na fresadora com duas direções da ferramenta: a primeira na direção perpendicular a peça e na direção fibras da madeira e a segunda na direção da peça e perpendicular às fibras. Utilizou-se três profundidades de usinagem 0,4; 0,8 e 1 mm com velocidade de corte de 32 m/min. Os resultados mostraram vários tipos de cavacos diferentes, o primeiro denominado tipo I foi formado quando as condições de corte ocasionaram a quebra da madeira, ou seja, foi obtido pela separação da mesma (Figura 20a). O segundo tipo II ocorre ao longo de uma linha a partir do corte, ou seja, ocorre por cisalhamento e produz cavaco contínuo (Figura 20b). O terceiro tipo III é produzido por ruptura a partir do comprimento paralelo e cisalhamento da madeira, os cavacos são fragmentados (Figura 20c).

Os resultados da força de corte para o *Pinus* e para o *Eucalyptus* foi de 24, 63 N/mm e 22,3 N/mm na direção paralela e na direção radial 35, 42 N/mm e 34,7 N/mm, respectivamente. Esses valores compatíveis em ordem de grandeza quando comparados com a mesma característica.

Wrublack et al. (2008) realizaram um levantamento bibliográfico para avaliar os parâmetros de corte no fresamento com foco no acabamento final e custos. Comenta-se que as variáveis de mais importância para estes itens são: a vida da ferramenta, qualidade de corte e acabamento superficial. A influência ocorre principalmente pela velocidade de corte, velocidade de avanço, profundidade de usinagem e sentido do corte. Com o aumento da velocidade de avanço diminui a potência, porém o acabamento superficial é prejudicado. O aumento da velocidade de corte resultou nos melhores acabamentos superficiais e se aliada a alta profundidade de usinagem aumenta significativamente a produtividade, ou seja, diminui os custos. A velocidade de corte também é diretamente ligada a potência. Conclui-se que para melhor acabamento deve-se considerar principalmente velocidade de corte, porém aliada a velocidade de avanço e profundidade de usinagem.

Figura 20– Tipos de cavaco- (a) Cavaco tipo I, (b) cavaco tipo II e (c) cavaco tipo III.



Fonte: adaptado de Gonçalves e Neri (2005).

Tibúrcio (2009) analisou a rugosidade do *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus citriodora* através do lixamento e fresamento da madeira. As amostras foram submetidas ao fresamento com velocidade de avanço de 10, 14 e 18 m/min e em seguida ao lixamento. Concluiu-se que os menores valores de rugosidade superficial nas duas espécies foram para o a velocidade de avanço de menor valor.

Saklakoglu e Kasman (2011) investigaram o desempenho do fresamento em diferentes parâmetros de operação para encontrar a melhor condição de rugosidade e profundidade de usinagem. A experiência do fresamento foi realizada por máquina de marcação a laser equipado laser de fibra tendo um comprimento de onda de 1064 nm. O movimento do feixe de laser e o processo os parâmetros foram controlados por um computador via software. A profundidade de usinagem e a rugosidade da superfície são alterados em função da peça de trabalho e dos parâmetros do processo. A rugosidade e profundidade de usinagem para todos experimentos depende significativamente da velocidade de varredura a laser e potência do laser. A rugosidade da superfície apresenta valores menores com a diminuição da potência do laser e frequência quando a superfície é usinada com alta velocidade de corte. Um valor mais baixo de velocidade de enchimento diminui a rugosidade. A diminuição da velocidade de digitalização e potência do laser é correspondido pelo aumento da energia. Insumo energético superior é produzido maior profundidade do fresamento.

Lima et al. (2012) utilizaram da literatura para obter os parâmetros de corte mais adequados para otimizar processos, diminuir custos, aumentar aproveitamento da peça, da ferramenta e da máquina. O experimento estudou a influência da profundidade de usinagem (63 mm) e velocidade de corte (396 m/min) na força do corte e do fresamento tangencial com metal duro. Os resultados demonstraram que a profundidade de usinagem e velocidade de corte influenciam significativamente a força de corte, a vida da ferramenta e principalmente os custos.

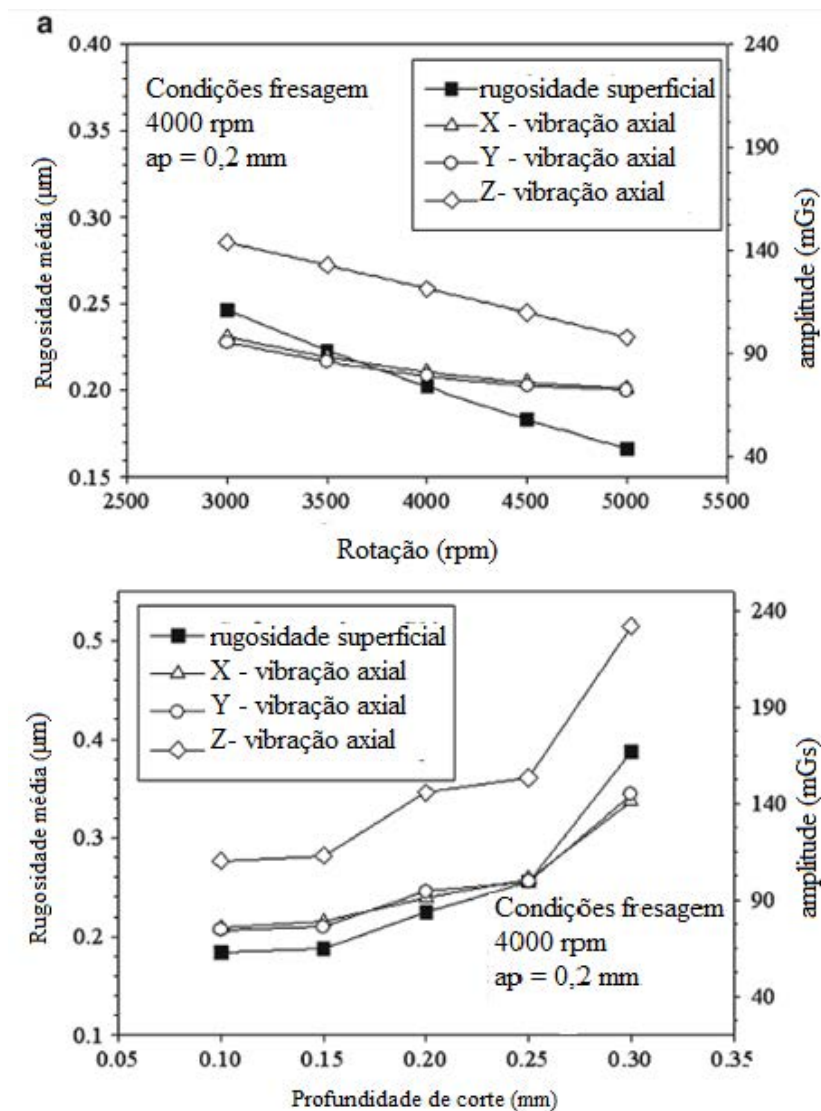
Valarmathi et al. (2013) realizaram a medição da força de avanço em painéis aglomerados que é comumente utilizado na indústria moveleira. As características da superfície são fortemente influenciadas pelos parâmetros de usinagem. Foram utilizadas rotações de 5000, 3000 e 1000 rpm correlacionada velocidade de avanço de 75, 150 e 225 mm/min. Os resultados demonstraram que os parâmetros da usinagem influenciam os defeitos no aglomerado. Baixos valores de velocidade de avanço e altos valores de velocidade de corte demonstraram ser mais satisfatórios para o acabamento, beneficiando mais a indústria moveleira.

Chen et al. (2012) estudaram o efeito das vibrações da ferramenta de corte na rugosidade superficial através da análise do espectro singular (SSA). A peça estudada com dimensões 100 x 100 x 32 mm foi submetida ao fresamento com rotações de 3000 rpm a 5000 rpm e profundidade de usinagem de 0,1 mm a 0,3 mm. Os resultados demonstraram que com a maior estabilidade da ferramenta de corte melhora os resultados na aspereza da peça, também nota-se a rugosidade sofre influência das velocidades de corte, de avanço e de profundidade de

usinagem. Na Figura 21 é mostrado a variação da rugosidade ( $R_a$ ) em relação a velocidade de corte, de avanço e profundidade de usinagem.

O menor valor médio da rugosidade ( $R_a$ ) é encontrado na maior velocidade de corte e menor velocidade de avanço e profundidade de usinagem. Pois quando se aumenta a velocidade de corte e diminui a velocidade de avanço ocorre a redução da força do corte e ocorre a rigidez do amortecimento da ponta da ferramenta de corte, influenciando na aspereza da peça.

Figura 21 – Relação entre a rugosidade em relação a e velocidades de corte, de avanço e profundidade de usinagem.



Fonte: Chen et al. (2012).

Kiswanto et al. (2014) observaram o desempenho dos parâmetros de corte da velocidade de corte, e velocidade de avanço na rugosidade de alumínio através de uma micro máquina de fresamento. Foram utilizadas três variações nas rotações: 35000, 70000 e 95000 rpm e profundidade de usinagem constante em 0,1 mm. Analisou-se a relação entre a velocidade de

corte e a rugosidade superficial. Os resultados demonstraram claramente que a rugosidade é menor com maior velocidade de corte e rotação de 95000 rpm.

A relação da velocidade de corte, velocidade de avanço, profundidade de usinagem e outras características da usinagem descritos aqui influenciam amplamente a rugosidade da peça, bem como na produtividade do processo.

### 2.3.6 Fresamento da madeira

O material madeira requer uma atenção especial no fresamento pois sua composição química, propriedades físicas e principalmente a anatomia influenciam o fresamento, devido a orientação das fibras e sua resistência.

Para fabricação de móveis, as operações de fresamento são quase imprescindíveis, consumindo boa parte do tempo de processos e tendo impacto significativo sobre a qualidade de acabamento superficial e sobre custos do produto final, destaca Souza (2009).

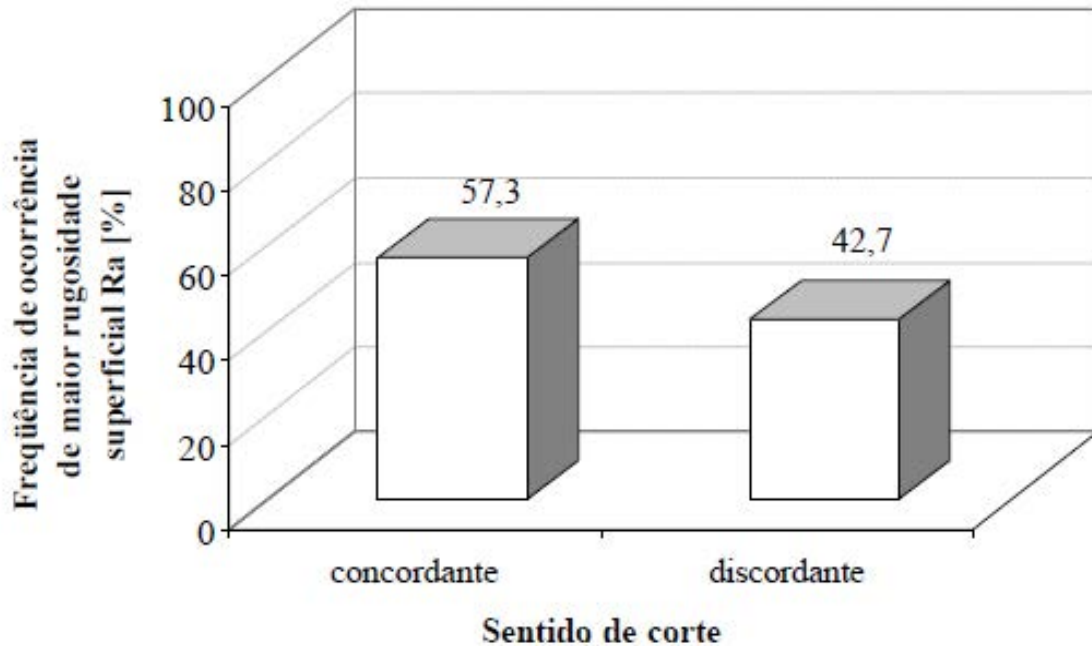
Goli et al. (2010) estudaram o comportamento do *Douglas fir* no fresamento concordante e discordante em diferentes direções de grã e destacaram as diferenças relevantes na usinagem de materiais anisotrópicos. Concluiu que há uma ampla oferta de fenômenos resultantes que há conexões relevantes entre orientações da grã, profundidade de usinagem e força de corte. A força de corte é proporcional à orientação de grã.

Souza (2009) mensurou o desgaste de ferramentas utilizando análise de imagens de digitalizadores de mesa a fim de aumentar o controle das condições de usinagem em operações de fresamento e diminuir os retrabalhos e desperdícios. Concluiu que o método proposto diminui para horas o tempo para obtenção de resultados de uma série completa de desgaste em operações de usinagem de madeira, além de mostrar que é um método rápido e sem alterações na máquina de usinagem.

A norma ASTM D1666 (2011) cita a facilidade de materiais a base de madeira serem usinados, porém as propriedades de usinagem (velocidades de corte e de avanço e profundidade) são secundárias, embora ainda influencie o acabamento superficial.

Castro e Gonçalves (2000) estudaram os valores de acabamento artificial em MDF através do processo de fresamento periférico com as velocidades de avanço 2,90; 4,10; 5,80; 8,20; 10,90; 15,15; 21,80 e 30,30 m/min e espessuras de corte de 1, 3 e 5 mm no sentido concordante e discordante. Os valores de rugosidade são menores no sentido concordante, como observa-se na Figura 22.

Figura 22 – Influência do sentido de corte na Rugosidade Ra.

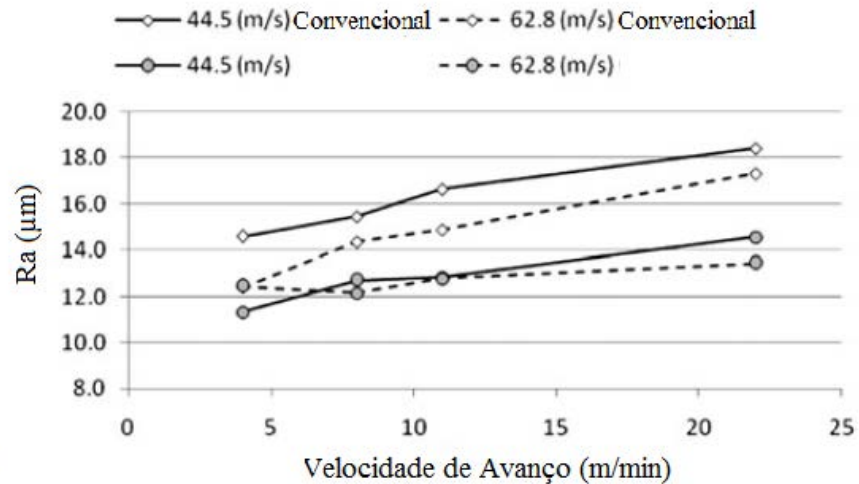


Fonte: Castro e Gonçalves (2000).

Ferreira (2010) avaliou a rugosidade das peças de madeira de *Khaya ivorensis* A. Chev. (Mogno africano) nos ensaios de usinagem de aplainamento e lixamento, com três velocidades de avanço diferentes: 6,0; 12,4 e 24 m/min. Observa-se os parâmetros de rugosidade Ra, Rt e Rz em relação as velocidades de avanço. O valor médio da rugosidade (Ra) encontrado no fresamento concordante (a favor da grã) não mostraram diferença significativa entre elas, porém para velocidade de alimentação 24 m/min apresenta menor valor de Ra. No sentido discordante (contra a grã) não houve diferença significativa para os valores de Ra encontrados entre as três velocidades de avanço avaliadas. Observa-se que com a menor velocidade de avanço 6 m/min a madeira apresentou menor rugosidade.

Em Aguilera (2011) a análise da rugosidade superficial de MDF através da usinagem variando a velocidade de corte em 44,5 e 62,8 m/s e quatro velocidades de avanço diferentes 4,2; 8,4; 10,8 e 21,5 m/min. A medida da rugosidade foi feita baseada na ISO 4287 (1997). Observa-se na Figura 23 que quanto menor a velocidade de avanço, menor será a rugosidade, o contrário da velocidade de corte que para rugosidade baixa apresenta valores altos.

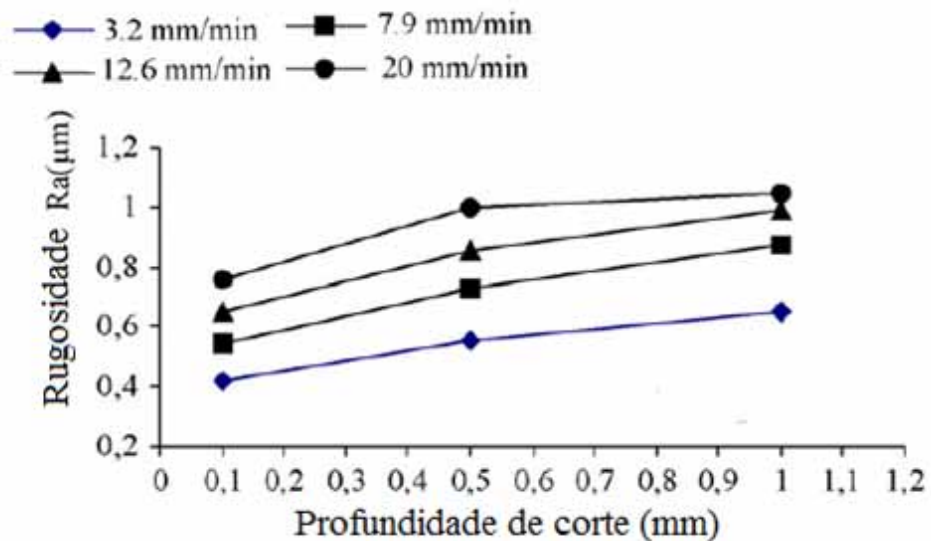
Figura 23 – Rugosidade superficial



Fonte: Aguilera (2011).

Savas e Ozay (2007) analisaram a rugosidade através do fresamento tangencial com rotações entre 180 a 450 rpm. A rugosidade foi medida através do rugosímetro Mitutoyo 211 que proporcionou a avaliação de Ra. A primeira etapa do trabalho tinha objetivo de investigar a ação da velocidade de corte na peça então estabelece-se os parâmetros: 180, 224, 280 e 450 rpm, profundidade de usinagem 0,1; 0,5 e 1 mm e velocidade de avanço 3,2; 7,9; 12,6 e 20 mm/min. Os resultados demonstram que as diferentes profundidades afetam em superfícies irregulares, quanto maior a profundidade maior a irregularidade, como observa-se na Figura 24.

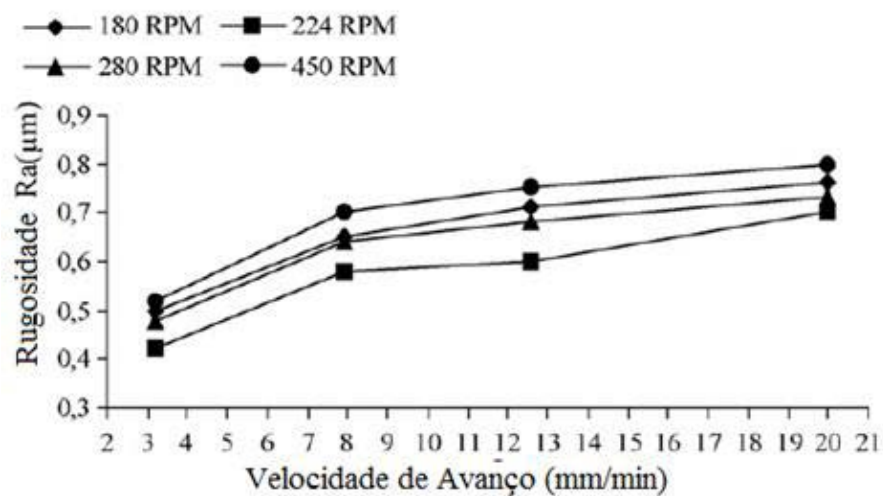
Figura 24 – Relação da profundidade de usinagem e rugosidade superfície.



Fonte: Savas e Ozay (2007).

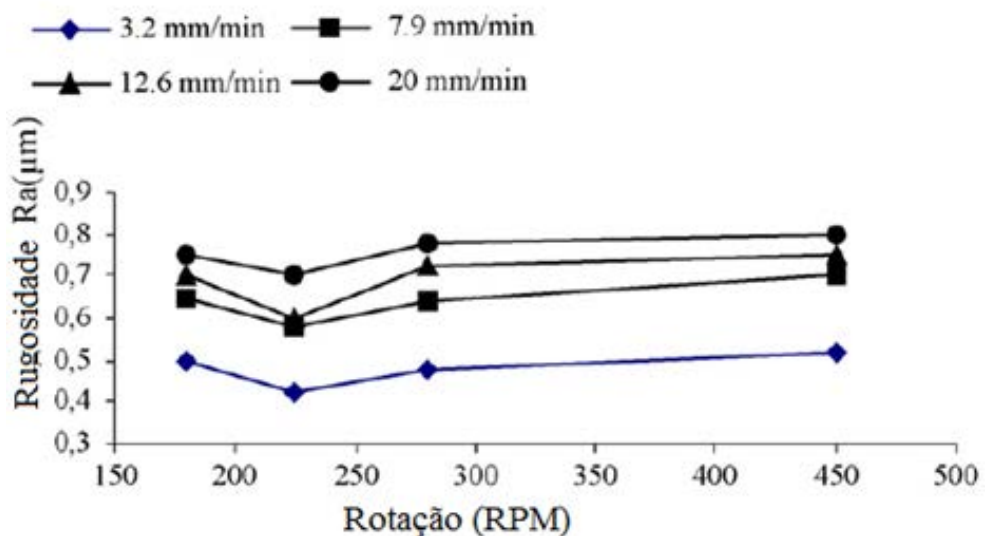
Já na Figura 25 é mostrada a rugosidade do fresamento com rotação de 530 rpm e profundidade de usinagem de 0,1 mm. Deste modo, nota-se que os menores resultados da rugosidade estão relacionados as menores velocidades de avanço. Os resultados referentes ao comportamento da rugosidade para as rotações (velocidade de corte) e mesmos parâmetros de corte demonstraram uma tendência a estabilidade com o aumento da rotação (Figura 26).

Figura 25 – Relação da velocidade de avanço e rugosidade superfície.



Fonte: Savas e Ozay (2007).

Figura 26 - - Relação da rotação e rugosidade superfície.



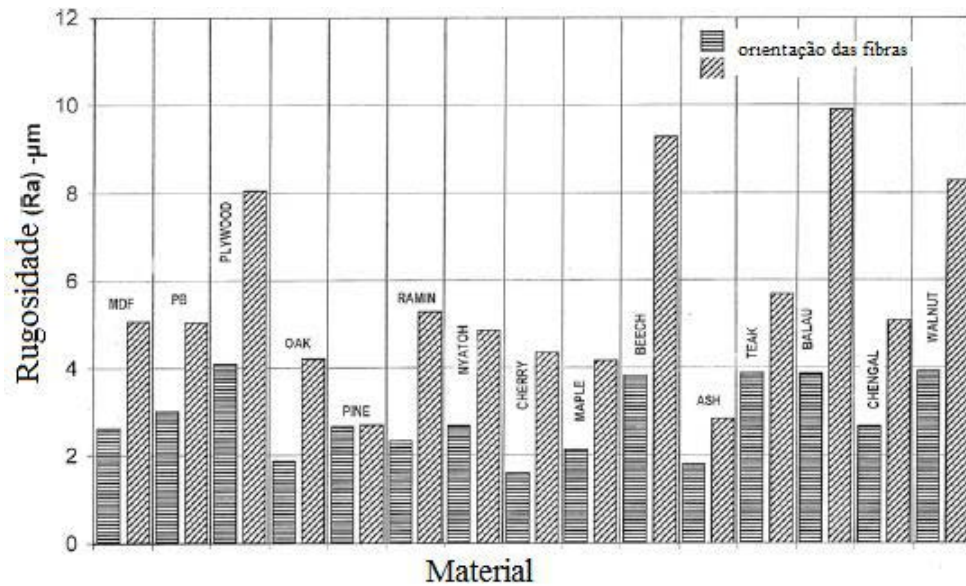
Fonte: Savas e Ozay (2007).



Goli et al. (2010) fizeram um estudo do comportamento de diferentes forças de corte no fresamento concordante e discordante em diferentes orientações de grã da madeira de *Douglas fir*. Pois a madeira como material anisotrópico apresenta diferenças relevantes na usinagem. A usinagem foi realizada com variação da direção da grã de dez em dez graus, sendo as amostras cortadas o mais próximo possível para não haver variabilidade. Durante o fresamento as medidas foram feitas por um dinamômetro piezoelétrico tri-axial e utilizou-se profundidade de usinagem de 0,5 a 1,5 mm. Os ensaios mostraram que a investigação da grã amplia vários fenômenos que necessitam ser discutidos mais profundamente, porém apresenta algumas conexões relevantes, por exemplo a relação da grã com a força de corte e profundidade de usinagem. Os autores comentam que esse estudo é apenas um suporte para investigações mais detalhadas das forças de corte.

Zhong, Hiziroglu e Chan (2013) investigaram a qualidade da superfície de painéis a base de madeira e madeiras utilizadas na indústria moveleira. Foram investigados MDF, carvalho (*Q. alba*), pinho (*P. strobus*), cherry (*P. serotina*), Maple (*A. rubrum*), cinzas (*F. alba*), nogueira preta (*J. nigra*), faia (*F. orientalis*), Ramin (*G. bancanus*), nhayot (*Sapotaceae*), teca (*T. grandis*), Balau e chengal (*N. hemii*) em diferentes orientações das fibras. Utilizou-se na medição da rugosidade um perfilometro stylus portatil Mitutoyo SurfTest SJ-301 com agulha de diamante. Os valores medios de rugosidade para cada espécie foram ilustrados na Figura 28. Observa-se que as espécies de pinho e cinzas obtiveram qualidade na superfície diferente de Faia e Balau que apresentaram mais aspereza. A madeira de cereja e cinzas tiveram características desejáveis para rugosidade diferente da madeira compensada e noz que não atingiram rugosidade satisfatória. A direção da grã paralela a ferramenta de corte demonstraram valores de rugosidade média sempre menor que a direção de grã com alguma inclinação, como é possível observar na Figura 27.

Figura 27 – Valores médios da rugosidade superficial dos painéis e madeiras analisadas.



Fonte: adaptado de Zhong, Hiziroglu e Chan (2013)

### 2.3.7 Comando numérico computadorizado (CNC)

O Comando numérico computadorizado (CNC) é um processo dinâmico para automação em usinagem, visando fabricação de peças através do uso de ferramentas de corte. Essas máquinas são controladas numericamente e são responsáveis por otimizar processos com maior velocidade, confiabilidade, eficiência mesmo em peças mais complexas. MARCO FILHO, 2013)

Segundo Espanhol (1989) o CNC é um computador interface que através de códigos permite o armazenamento e utilização de dados no comando de uma máquina operacional.

Marco Filho (2013) cita que na usinagem CNC o projeto antevê a execução eliminando assim possíveis erros. O programador CNC deve se atentar ao desenho do projeto, dispositivos e planos de fixação, instrumentos de medição e lista de ferramenta.

Lima e Silveira (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.

Lyra (2010) descreve que a fresadora desloca o material que está fixado a uma mesa base (Figura 28) com dispositivos de fixação com ventosas mostradas no detalhe a da Figura 28. Possui motor de alta velocidade e um mandril com ferramenta de corte fixada. Com a movimentação da mesa e a rotação da fresa o material é removido.

Figura 28 – Mesa base Fresadora CNC Tech Z1. 6a - dispositivos de fixação com ventosas.



Fonte: O autor.

Fresadora CNC é a máquina que funciona a partir do comando programado, baseado em comando numérico em qualquer perfil geométrico que obedecem ao sistema de coordenadas cartesiana (MACHADO et al. 2009).

Neste trabalho a máquina utilizada foi a Furadeira - Fresadora - CNC Tech Z1 da empresa SCM GROUP S.P.A (2011). Segundo a empresa esta máquina trabalha com madeira e materiais de mesmo atributo, trabalham ao longo dos eixos X, Y e Z como é mostrado na Figura 29.

Os movimentos na fresadora ocorrem através do deslizamento de patins de recirculação de esferas sobre guias prismáticas. Os dispositivos para o posicionamento das peças, de referência por batente e o plano de trabalho são instalados sobre uma base. (SCM GROUP S.P.A, 2011).

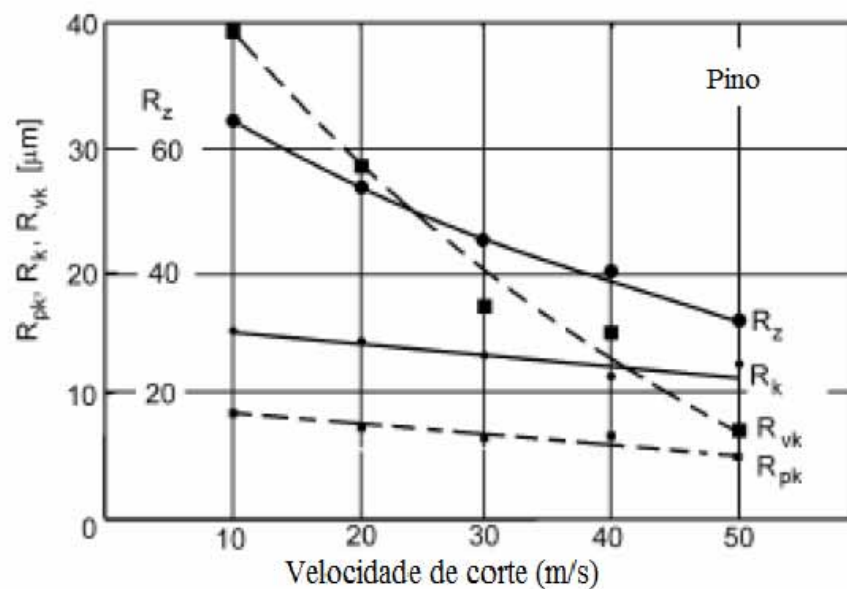
Figura 29 - A máquina Furadeira - Fresadora CNC Tech Z1



Fonte: ALMEIDA (2013).

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 aritmética, como mostrado na Figura 30.

Figura 30 – Parâmetros de rugosidade em função da velocidade de corte.

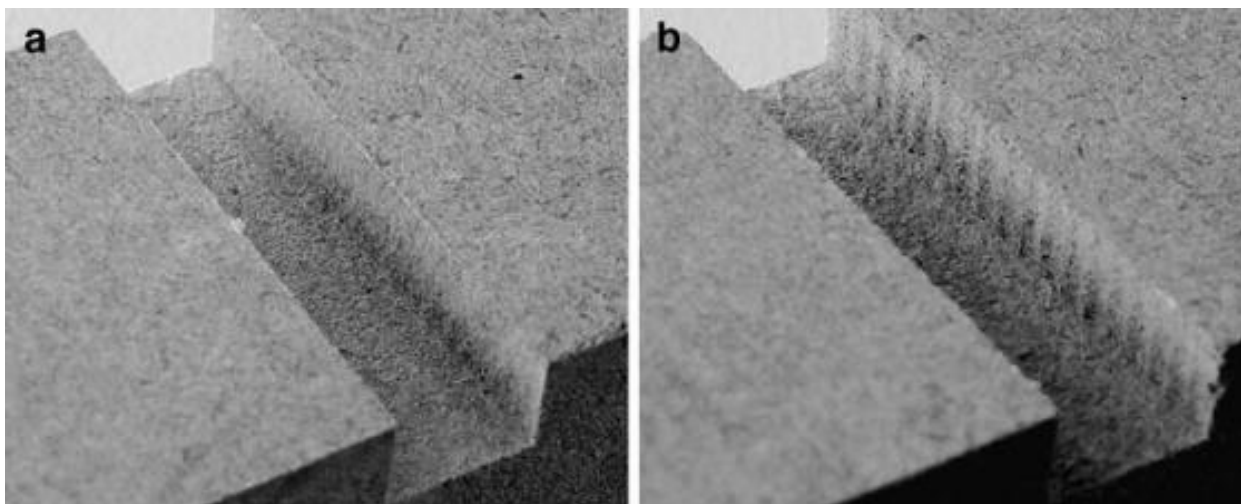


Fonte: Magoss (2008).

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

Em Davim et al. (2009) investigou-se superfícies usinadas de MDF de espessura de 16 mm através de um centro de fresamento CNC (Exakta) com potência de 15kW. Utilizou-se das rotações de 3000, 10500 e 18000 rpm, velocidades de avanço de 0,50; 2,75; 3,88 e 5 m/min. A rugosidade foi medida com um rugosímetro de agulha de diamante com 5  $\mu\text{m}$  e cut-off 2,5 mm. Ressaltou-se que os valores de rugosidade são influenciados pelas diferentes rotações. Nesse estudo, os menores valores encontrados demonstram que a menor rugosidade está relacionada a maiores rotações. Na Figura 31 é mostrado o efeito da velocidade de avanço na rugosidade obtida na amostra, no qual observa-se com a menor velocidade de avanço 0,5 m/min (Figura 31a) corresponde ao acabamento superficial de qualidade.

Figura 31 – Aspecto da rugosidade das amostras. a) 3000 rpm e 0,5 m/min b) 3000 rpm e 5 m/min.

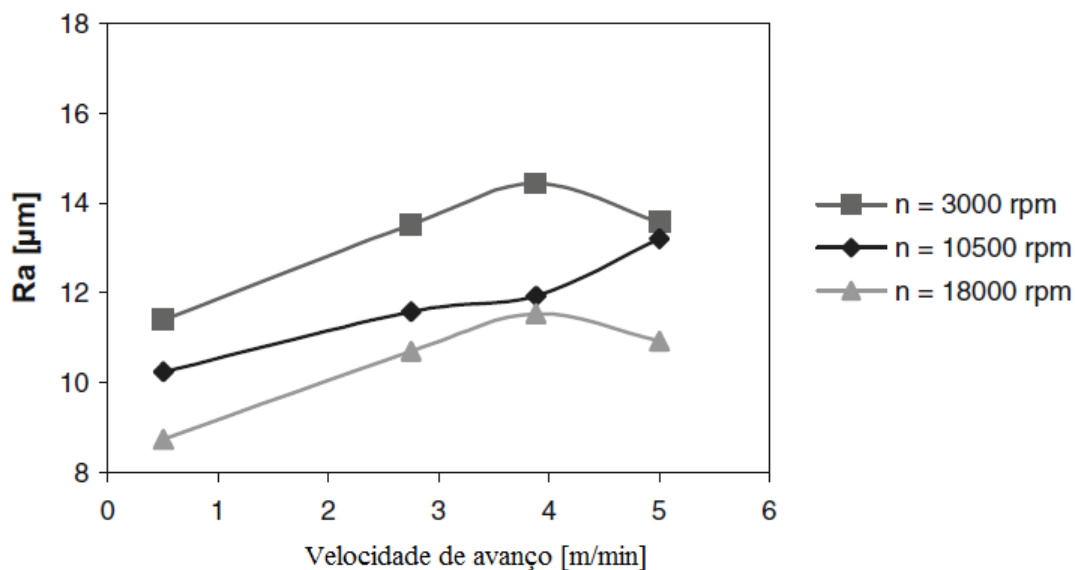


Fonte: Davim et al. (2009).

Observa-se que quando se aumenta a velocidade do corte, os valores da rugosidade média (Ra) são menores e ideais, como ilustrado na Figura 32.

Sen et al. (2013) analisaram as variações na força do corte através do fresamento CNC em materiais compósitos de fibras reforçadas. Utilizou-se rotações de 2000 rpm a 8000 rpm com velocidade de avanço fixa em 520 mm/min e profundidade de usinagem de 12 mm. Percebe-se que o comportamento nas maiores velocidades de corte é mais homogêneo e apresenta as menores variações na periodicidade.

Figura 32– Rugosidade média em função da velocidade de corte e da velocidade de avanço.



Fonte: Davim et al. (2009).

Em Lima e Silveira (2013) efetuou-se a retirada de material de uma cavidade complexa através do fresamento com programação CNC. Realizou-se a revisão dos métodos de cálculo para se obter a trajetória da ferramenta, deste modo utilizou-se do modelo matemático diagrama de Voronoi. Concluiu-se que o modelo matemático escolhido foi capaz de gerar a trajetória da ferramenta com diferentes profundidades de usinagem e estrutura de contorno, no qual pode ser aplicada a geometrias simples e modelos complexos. Com a automatização do processo através da implantação de um modelo é possível diminuir tempo e possíveis erros de processos além de aumentar a qualidade e homogeneidade dos produtos.

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.

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 encontra na

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

### 2.3.8 Ferramentas

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 et al, 2011).

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, COPPINI E MARCONDES, 2013).

Os aços rápidos foram desenvolvidos para suportar velocidade de corte alta e 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, COPPINI E MARCONDES, 2013).

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 composto de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) é mais tradicional, porém existe a cerâmica pura, cerâmica mista e pode ser reforçado com carbetto 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, COPPINI E MARCONDES, 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).

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 et al, 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 (TEIXEIRA et al, 2011).

O diamante possui elevada dureza e são utilizados quando se necessita de alta precisão. Quando aliado a altas 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).

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 et al, 2009 e DINIZ, COPPINI E MARCONDES, 2013).

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 compósito 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 apresentaram desempenho adequados de dureza, coeficiente de atrito e desgaste.

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 necessitam-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 sylvatica* (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 observou-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 é 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. Para a comparação dos resultados de medição, tanto o desgaste do gume da ferramenta, como os valores de rugosidade medidos mostram-se, que a danificação do gume da ferramenta de metal duro não provoca nenhuma deformação na superfície do corpo de prova usinado.

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.

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 o de NbC possuem alta resistência, devido ao refinamento do grão da matriz do metal duro. O TiN exibe uma maior estabilidade, deste modo evita diminuir 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 (CVD) 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 transversal as fibras (corte 90-90) da madeira. Em seguida, comparou-se o desempenho das ferramentas através medição dos desgastes na cunha de corte. 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.

### **2.3.9 Potência**

Nas operações de fresamento o consumo de potência pode evidenciar itens muito importantes tais como: a rapidez, a rigidez e a transmissão de máquinas operatrizes. Na usinagem o consumo de potência demonstra o desempenho do corte, segundo Gonçalves et al. (1998).

Ferraresi (1977) conta que a força de usinagem é a força total que atua sobre uma cunha cortante durante o processo. Os componentes de força no plano de trabalho contribuem para a potência de usinagem. Diniz, Coppini e Marcondes (2013) dizem 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 de usinagem.

Segundo Ferraresi (1977) e Diniz, Coppini e Marcondes (2013) a potência de corte é o produto da força de corte com a velocidade de corte, como observa-se na Equação 2.4:

$$N_c = \frac{P \cdot v}{60 \cdot 10^3} \quad (2.4)$$

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 é o produto da força de avanço com a velocidade de avanço, Equação 2.5.

$$N_a = \frac{P_a \cdot v_a}{60 \cdot 10^3} \quad (2.5)$$

No qual  $N_a$  é a potência de avanço em kW,  $P_a$  é a força de avanço em Newton,  $v_a$  é a velocidade de corte em metros por minuto.

A potência fornecida pelo motor nas máquinas para um único motor, segue a Equação 2.6:

$$N_m = \frac{N_c}{\eta} \quad (2.6)$$

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.

Também 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 2.7 é possível obter a potência aparente para motores trifásicos:

$$P_{ap} = U \cdot i \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi \quad (2.7)$$

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).

Segundo Pinheiro (2014) para a transformação do dado adquirido em Volts para Amperes utiliza-se a Equação (2.8), porém, se for necessário utilizar um transformador de corrente de redução 25A/5A, a variável  $U_{CC}$  deve ser multiplicada por 5.

$$i = \frac{U_{CC} \cdot 5}{2} \quad (2.8)$$

Onde  $i$  é a corrente em Amperes e  $U_{CC}$  é a tensão da corrente contínua em Volts.

Substituindo o valor da corrente Equação (2.7), 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 (2.9), que será utilizada para transformar o sinal adquirido em Volts para potência consumida em Watts.

$$P_{apF} = \frac{U_{CC} \cdot 5}{2} \cdot 220 \cdot 0,92 \cdot \sqrt{3} \quad (2.9)$$

Ferraresi (1977) e Diniz, Coppini e Marcondes (2013) comentam 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. O material foi submetido ao lixamento com três granulometrias diferentes e analisou-se os dados para estabelecer a significância estatística das variáveis e suas interações. Os resultados demonstram que o aumento do consumo de energia aumentou a pressão, ou seja, ocorre um crescimento linear. Porém, em relação ao do tipo de espécies de madeira o consumo de energia se manteve aproximadamente constante para a mesma pressão e os níveis de velocidade.

Souza et al. (2009) avaliaram 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. Todas as amostras ensaiadas no fresamento apresentaram desempenho adequado. 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. Investigou-se as relações da velocidade de corte, velocidade de avanço, número de dentes e ao tipo de clone. 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.

Melo (2013) verificou a influência da estrutura anatômica no consumo da energia específica de corte das madeiras de *Eucalyptus urophylla* e *Corymbia citriodora*. Foram submetidos ao processamento com velocidade de avanço de 17 m/mm e velocidade de corte de 46 m/s. Os resultados não demonstraram diferenças estatísticas entre as espécies estudadas, somente houve diferença no sentido anatômica da madeira, sendo o consumo maior na direção longitudinal. Observou-se também que a densidade elevada consome mais energia.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

A análise da influência das velocidades de corte ( $V_c$ ), velocidades de avanço ( $V_a$ ), profundidade de usinagem ( $a_p$ ) no processo de fresamento foi realizada em um centro de usinagem com Comando Numérico Computadorizado (CNC).

Os procedimentos para preparação dos corpos de prova e método de usinagem estão descritos a seguir.

Para todos os parâmetros de corte foram realizados o Teste de Tukey para verificação da estatística através do programa SISVAR.

### 3.1 MATERIAL

Para a preparação dos corpos de prova foi utilizado uma serra seccionadora TECMATIC, modelo FIT 2.9 (Figura 33), que cortou uma placa de MDF nas chapas retangulares utilizadas. Foi utilizado o MDF- medium density fiberboard de uso comercial da marca Duratex com espessura de 15 mm e placa revestida.

Figura 33 -Serra seccionadora TECMATIC.



Fonte: O Autor.

Os corpos de prova foram preparados com dimensões de 300 x 65 x 15 mm para o fresamento tangencial e estão apresentados na Figura 35, num total de 36 peças, como é mostrado na Figura 34.

Figura 34 – Corpo de prova em MDF para fresamento tangencial.



Fonte: O Autor.

Para o fresamento frontal as dimensões foram de 420 x 140 x 15 mm e estão apresentados na Figura 36, totalizando 12 corpos de prova, como é mostrado na Figura 35.

Figura 35 – Corpo de prova em MDF para fresamento frontal.



Fonte: O Autor.

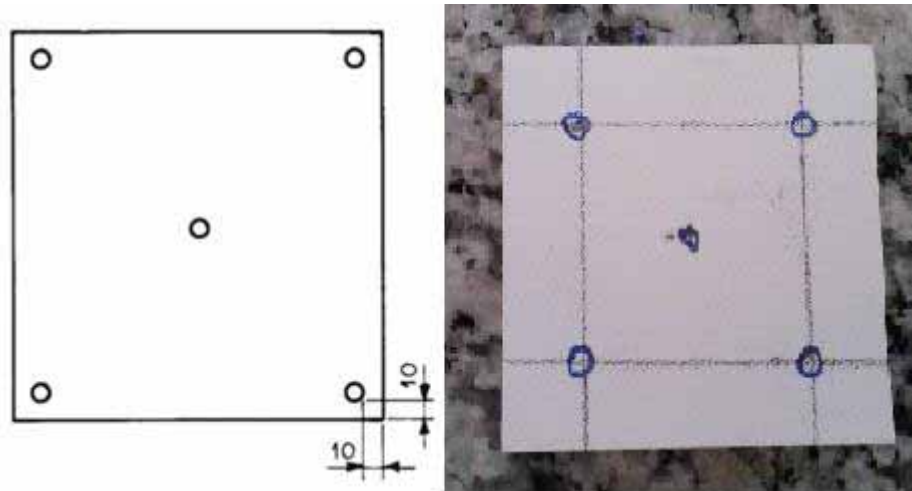
### 3.2 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE E DO TEOR DE UMIDADE DO MDF

A determinação da densidade e do teor de umidade do painel de MDF utilizado neste trabalho foi baseada na Norma ABNT NBR 15316-3 Métodos de Ensaio.

#### 3.2.1 Densidade

O corpo de prova foi preparado nas dimensões com 50 x 50 x 15 mm e com pontos de medições determinados no centro e em cada canto e com exatos 10 mm de afastamento da borda, como ilustrado na Figura 36.

Figura 36 – Corpo de prova de densidade e umidade.



Fonte: NBR 15316-3.

Após a identificação dos corpos de prova foram determinados a espessura, comprimento e largura com resolução de 0,1 mm. Em seguida foi determinada a massa numa balança da marca Marte.s AS2000C com resolução de 0,1 g. Por fim, foram calculados segundo a Equação 3.1 e 3.2.

Os dados de largura, comprimento e espessura foram obtidos anteriormente com um paquímetro e um micrômetro da marca Digimess (Figura 37), já os dados de massa foram obtidos por balança analítica (Figura 38).

$$D = \frac{M}{V} \cdot 1000000 \quad (3.1)$$



E

$$V = L \cdot C \cdot E \quad (3.2)$$

Onde:

D = densidade do corpo de prova, em quilogramas por metro cúbico (kg/m<sup>3</sup>);

M = massa do corpo de prova, em gramas (g);

V = volume do corpo de prova, em milímetros cúbicos (mm<sup>3</sup>);

L = largura do corpo de prova, em milímetros (mm);

C = comprimento do corpo de prova, em milímetros (mm);

E = espessura do corpo de prova, em milímetros (mm);

Figura 37 – Paquímetro e Micrômetro.



Fonte: O Autor.

### 3.2.2 Teor de umidade

Para obtenção do teor de umidade os corpos de prova foram pesados individualmente obtendo assim a massa úmida. A seguir foram colocados em uma estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  até que as duas últimas medidas obtivessem massa constante ou com diferenças de 0,1%. Após a retirada e resfriamento os corpos de prova foram pesados novamente obtendo assim a massa seca, segundo a Norma ABNT NBR 15316-3 Métodos de Ensaio.

O teor de umidade então foi calculado segundo a Equação 3.3:

$$U = \frac{M_U - M_S}{M_S} \quad (3.3)$$

Onde

$U$  = umidade residual do corpo de prova, em porcentagem (%);

$M_U$  = massa úmida do corpo de prova, em gramas (g);

$M_S$  = massa seca do corpo de prova, em gramas (g);

Figura 38 – Pesagem do corpo de prova.



Fonte: O Autor.

### 3.3 PROCEDIMENTOS DO ENSAIO DE USINAGEM

Os equipamentos utilizados para as coletas de dados dos experimentos, fixação e retirada dos corpos de prova no suporte da bancada do centro de usinagem, medição da rugosidade superficial são descritos neste capítulo. Todos os procedimentos realizados no centro de usinagem foram realizados por uma única pessoa, a fim de minimizar os efeitos dos erros atribuídos ao operador.

### 3.3.1 Usinagem

Os ensaios de fresamento tangencial e frontal foram realizados em um centro de usinagem com Comando Numérico Computadorizado (CNC) modelo TECH Z1 marca SCM (Figura 39). Esta máquina trabalha com unicamente com madeira ou materiais com atributos físicos semelhantes. A estrutura desta máquina é basicamente constituída por dois elementos principais: base portante (detalhe a na Figura 39) e o montante monobloco que translada ao longo do eixo X (detalhe b).

O grupo operador, com motor de 2,2 kW (detalhe c) é composto por um cabeçote de usinagem. Ele está disposto sobre uma prancha (detalhe d), que se movimenta sobre o montante móvel (detalhe b) ao longo do eixo Y e que engloba movimentos ao longo do eixo Z, a fixação das peças a serem usinadas é realizada pelos dispositivos com ventosas pneumáticas (detalhe e), a máquina também possui uma unidade de controle de operações e estruturação de programas de usinagem (detalhe f). Na Figura 39 também observam-se as direções dos eixos X na direção do comprimento, Y na direção do perpendicular e Z na direção da cabine da máquina.

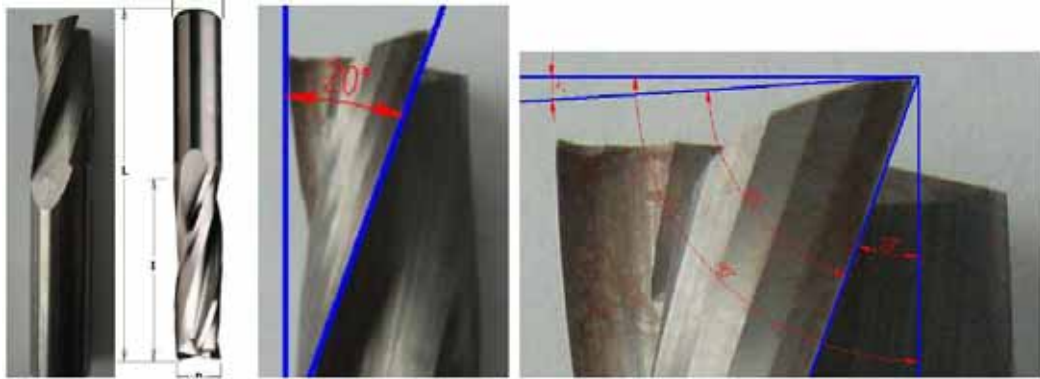
Figura 39 - Centro de usinagem: (a) base portante; (b) montante monobloco móvel; (c) grupo operador; (d) prancha que suporta o cabeçote de trabalho; (e) ventosas de fixação das peças a serem usinadas e (f) unidade de operações e estruturação de programas.



Fonte: O Autor.

A fresa utilizada foi a fresa de metal duro integral tipo “topo” para acabamento, com três dentes de corte em hélice, modelo HWM- 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 193.161.11. (Figura 40)

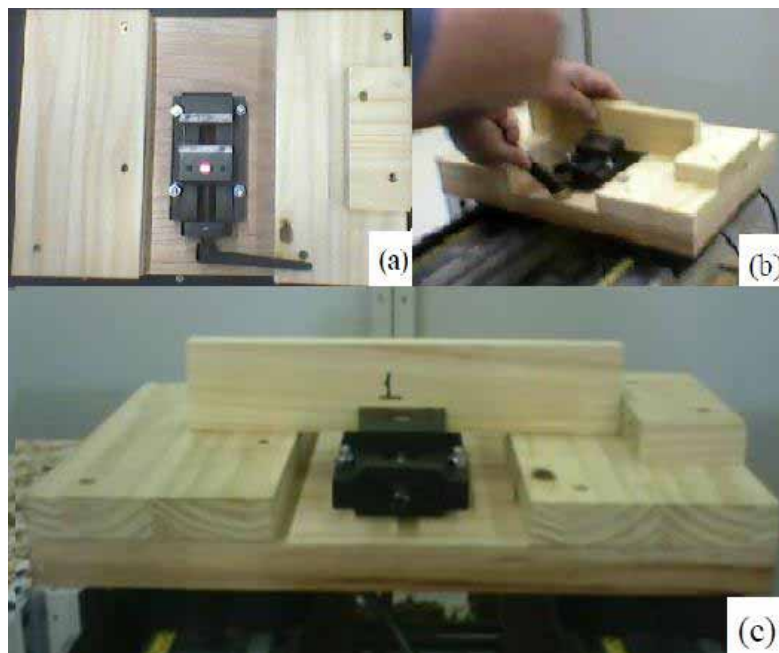
Figura 40 – Fresa de topo com três arestas de corte em hélice de metal duro, modelo HWM- Premium - Upcut Spiral Bit para acabamento



Fonte: Pinheiro (2014).

Para a fixação adequada dos corpos de prova na bancada do centro de usinagem foi utilizado um suporte onde eram fixados os corpos de prova (Figura 41 detalhe a). A confecção do suporte foi descrita por Pinheiro (2014) e por sua vez foi fixado pelas ventosas pneumáticas do centro de usinagem (Figura 41 detalhe b). Este suporte auxilia, pois a usinagem que deveria ocorrer na maior face dos corpos de prova (largura) no sentido do comprimento, não se torna possível uma vez que as ventosas do centro de usinagem não conseguiria prender os corpos de prova utilizando a outra face (espessura).

Figura 41 - (a) suporte adaptado para fixação dos corpos de prova; (b) colocação do corpo de prova no suporte; (c) corpo de prova pronto para ser usinado.



Fonte: Pinheiro (2014)

Os parâmetros utilizados no fresamento tangencial e frontal são descritos no Quadro 2. As rotações utilizadas neste trabalho foram estabelecidas nos valores 16000, 12000, 8000 e 4000 rpm, utilizando uma fresa de acabamento, de topo de dentes helicoidais, de 16 mm de diâmetro. Assim, os cálculos de determinação da velocidade de corte foram determinados pela Equação 2.1, e resultaram respectivamente em 804 m/min, 603 m/min, 402 m/min e 201 m/min. As velocidades de avanço foram calculadas através da Equação 2.2 foram 2 m/min, 4 m/min e 6 m/min. As profundidades de usinagem utilizadas no fresamento tangencial foram 0,5 mm; 1,0 mm e 1,5 mm. Já no fresamento frontal foram utilizadas 3 mm, 6 mm e 9 mm.

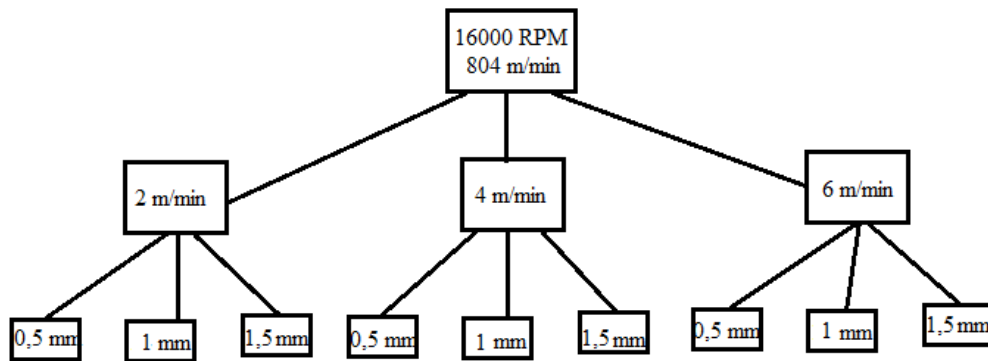
Quadro 2 - Valores dos parâmetros utilizados nos ensaios de usinagem.

<b>Rotação(RPM)</b>	4000	8000	12000	16000
<b>Velocidade de corte (m/min)</b>	201	402	603	804
<b>Velocidade de Avanço (m/min)</b>	2	4	6	
<b>Profundidade de usinagem Tangencial (mm)</b>	0,5	1	1,5	
<b>Profundidade de usinagem Frontal (mm)</b>	3	6	9	

Fonte: O Autor

Os corpos de prova de MDF foram fresados tangencialmente no sentido concordante e discordante com 6 repetições em cada direção. Os ensaios relacionaram cada velocidade de corte com três velocidade de avanço e três profundidades de usinagem, totalizando 432 ensaios, como ilustrada na Figura 42. Deste modo, é possível obter subsídios para uma análise estatística adequada.

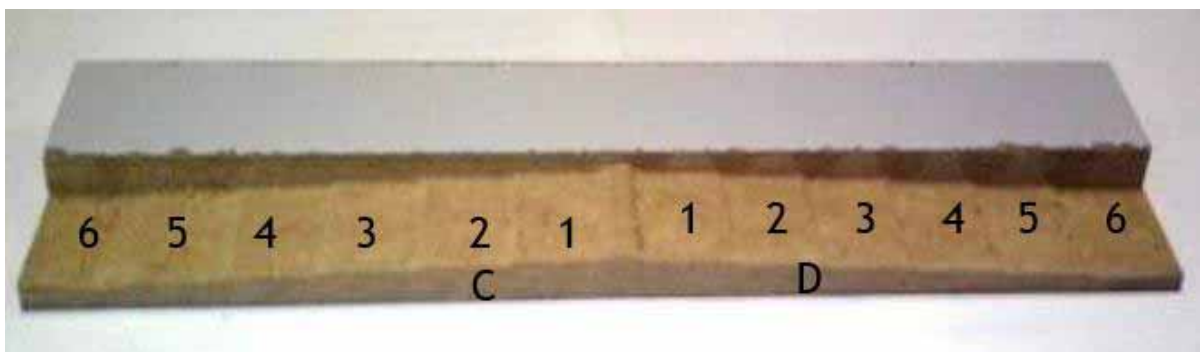
Figura 42 – Fluxograma dos ensaios de usinagem para cada rotação.



Fonte: O Autor

Através da programação do centro de usinagem seis repetições consecutivas de usinagem para cada sentido de corte em cada corpo de prova foram realizadas. Inicialmente ocorria uma usinagem sobre a face do corpo de prova para eliminar possíveis desalinhamentos proporcionados pela fixação do corpo de prova no suporte. Após esse processo, a ferramenta realizava o movimento de retornar a posição inicial, em seguida iniciava novamente o processo de usinagem. A ferramenta fazia seis usinagens no sentido discordante e depois mais seis usinagens no sentido concordante, no qual gerava uma área usinada de 25 x 30 mm (Figura 43), e ao final da usinagem conforme a programação pré-definida ocorria a interrupção automática da operação. Logo em seguida, os corpos de prova eram acondicionados em sacos de polietileno lacrados, sendo esses abertos somente no momento da mediação da rugosidade.

Figura 43 – Corpo de prova usinado – fresamento tangencial.

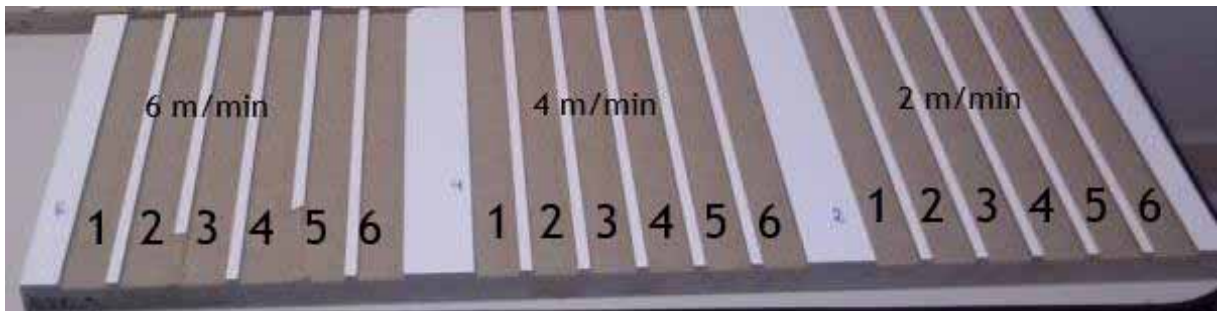


Fonte: O Autor

Na direção frontal os corpos de prova de MDF foram fresados, gerando assim 6 repetições usinadas para cada velocidade de corte relacionada a uma velocidade de avanço e profundidades de usinagem específica, percorrendo 100% da peça e totalizando 18 trechos (Figura 44).



Figura 44 – Corpo de prova usinado – fresamento frontal.



Fonte: O Autor

### 3.4 DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO MDF

Para a medição da rugosidade média das peças representada pelo parâmetro rugosidade média ( $R_a$ ) foi utilizado um rugosímetro da marca TAYLOR HOBSON, modelo sultronic 25 (Figura 45, detalhe a), com haste de medição com ponta apalpadora cone-esférico de diamante, raio de ponta de  $2\ \mu\text{m}$  (Figura 45, detalhe b). Os parâmetros do rugosímetro são: Cut-off  $2,5\ \text{mm}$ , comprimento de medição  $12,5\ \text{mm}$ , filtro Gaussiano robusto e Range (resolução) de  $300\ \mu\text{m}$ . As medidas deram ênfase no parâmetro de Rugosidade Média ( $R_a$ ), dada em unidades de micrometro ( $\mu\text{m}$ ).

Figura 45- a) Rugosímetro Modelo SURTRONIC 25+; marca TAYLOR HOBSON. b) Haste de medição do Rugosímetro.



Fonte: O Autor

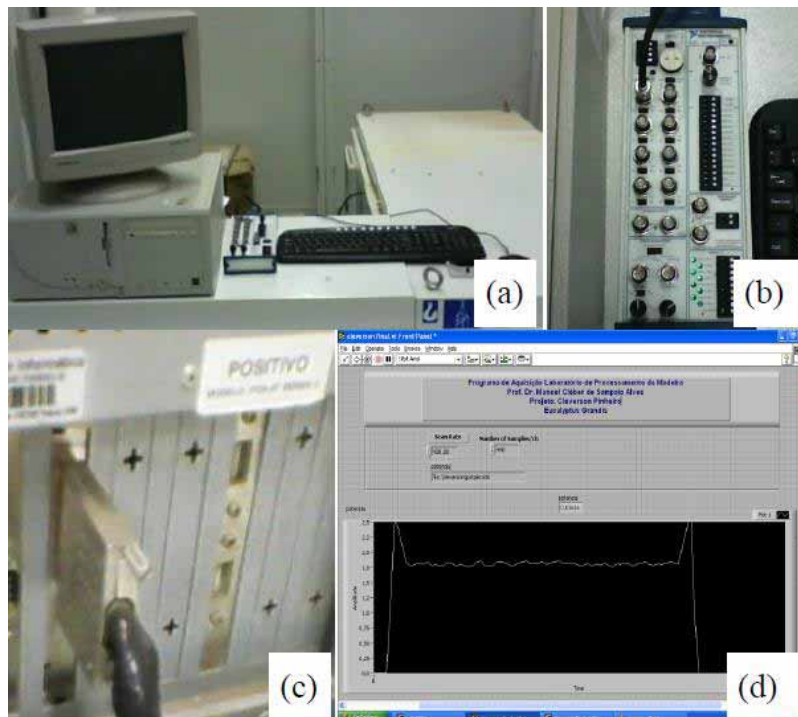
### 3.5 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA CONSUMIDA

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, que realiza a medição eletrônica de correntes de onda em corrente alternada, ele possui saída de tensão 0-10V 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 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 á uma taxa de 400 pontos por segundo através do sensor de efeito Hall instalados no centro de usinagem. O sensor de efeito Hall foi conectado a um módulo de canais da marca National Instruments modelo BNC-2120 (Figura 46, detalhe b), e este conectado a placa de aquisição de dados marca National Instruments modelo NI PCI 6220 (Figura 46, detalhe c) inserida do computador de aquisição de dados posicionado ao lado do centro de usinagem (Figura 46, detalhe a). Os sinais adquiridos através da placa foram processados e armazenados através de um programa pré-elaborado no software LABVIEW versão 7.1 (Figura 47 d).

Figura 46 - (a) computador para aquisição de dados; (b) módulo de canais; (c) placa de aquisição de dados e (d) tela do software LabView, com o sinal sendo coletado.



Fonte: Pinheiro (2014)



A potência consumida foi calculada através da Equação (2.6), 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 Amperes para que se possa aplicar esse valor na Equação (2.7). O fabricante do transdutor de corrente alternada fornece essa equação para a transformação do dado adquirido em Volts para Amperes de acordo com a Equação (2.8), 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 (2.8), 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 (2.9), que foi utilizada para transformar o sinal adquirido em Volts para potência consumida em Watts.

### 3.6 ANÁLISE DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL

Para a realização das imagens foi escolhido corpos de prova do fresamento tangencial no sentido concordante e discordante na velocidade de avanço de 2 m/min e profundidade de 1,5 mm para todas as velocidades de corte. Assim como foram escolhidos corpos de prova do fresamento frontal para todas as velocidades de corte, velocidade de avanço de 4 m/min e profundidades de 3, 6 e 9 mm. As imagens foram geradas por um microscópio eletrônico de varredura e um microscópio confocal para a análise de topografia.

#### 3.6.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Usou-se o microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO LS-15 com aberturas para o modo EP (pressão estendida), em atmosfera de  $N_2$ , a 5 kV (microscopia de baixa voltagem) em pressões da ordem de 60 Pa, coletando o sinal de elétrons retro espalhados com o detector VPSE-G3 (Figura 47). Este microscópio está instalado no campus da Unesp de Guaratinguetá, na Faculdade de Engenharia. As imagens foram obtidas pelo Professor Dr. Titular - Microscopia e Caracterização de Estruturas, Luis Rogerio de Oliveira Hein.

Figura 47 - Microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO LS-15

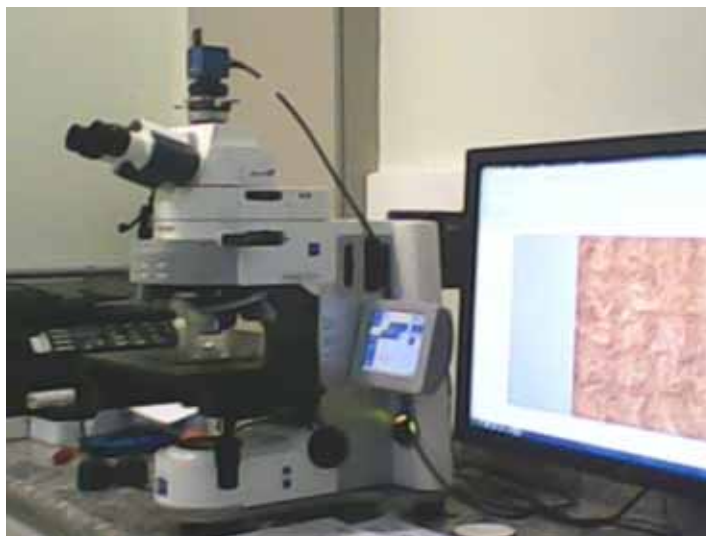


Fonte: (O Autor)

### 3.6.2 Topografia das superfícies

Usou-se o Microscópio confocal e interferômetro da marca Zeiss, modelo Axio Imager Z2m (Figura 48). Este microscópio está instalado no campus da Unesp de Guaratinguetá, na Faculdade de Engenharia. Este aparelho possui sistema completo para microscopia correlativa de análise de materiais com luz refletida em campo claro e no campo escuro, os ensaios deste trabalho foram realizados em campo escuro.

Figura 48 - Microscópio confocal e interferômetro Aixio Imager Z2m.



Fonte: (O Autor)

### 3.7 PROCESSAMENTO DE DADOS

Os dados da Rugosidade média (Ra) e total (Rt) foram obtidos pelo Rugosímetro e os dados de potência pelo sensor de efeito hall.

Os dados de Rugosidade (Ra) foram tratados todos os cálculos estatísticos foram efetuados com o auxílio do software Minitab 17. Os resultados são resumidos e objetivos com valores de p-value 5%.

Os dados da Rugosidade média (Ra) e total (Rt) foram tratados no programa SISVAR<sup>®</sup> para determinação da estatística através do Teste de Tukey. Foram relacionadas as velocidades de corte, velocidades de avanço, profundidade de usinagem e potência.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O painel de MDF – médium density fiberboard utilizado neste trabalho, obteve como resultado de densidade básica média  $736,22 \text{ Kg/m}^3$  e umidade média de 8,33%.

### 4.1 ANÁLISE DO EFEITO DAS INTERAÇÕES DOS PARÂMETROS DE CORTE PARA A RUGOSIDADE (Ra).

Os valores médios de rugosidade coletados para o processo de fresamento tangencial concordante e discordante com seus respectivos valores de rugosidade (Ra) em relação as velocidades de corte e velocidades de avanço, foram tratados pelo programa estatístico Minitab 17 para determinação dos parâmetros de corte significativos.

Os parâmetros de corte calculados no Minitab possuem denominação numeral, tal como as velocidades de corte 201, 402, 603 e 804 m/min são equivalentes a 1, 2, 3 e 4, respectivamente. As velocidades de avanço 2, 4 e 6 m/min são equivalentes a 1, 2 e 3 respectivamente. Por fim as profundidades de usinagem 0,5; 1 e 1,5 mm são equivalentes a 1, 2 e 3 respectivamente. O sentido concordante equivale a 1 e o discordante equivale a 2.

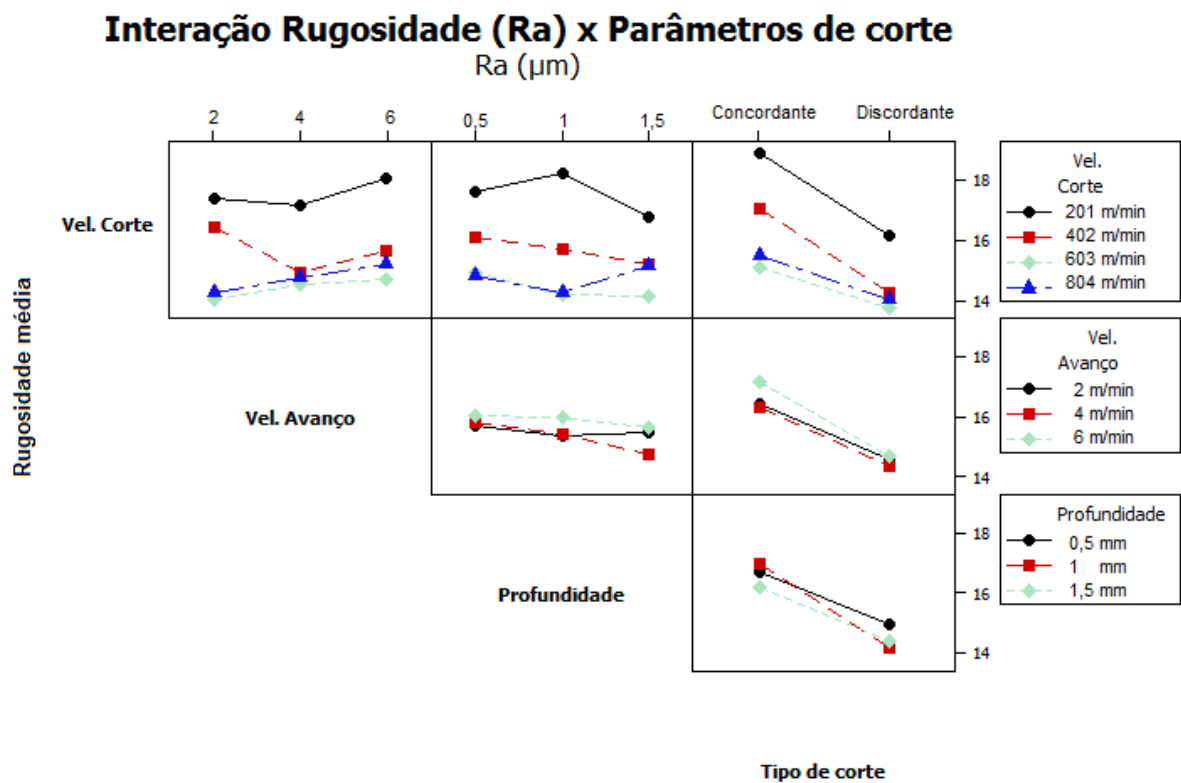
A análise de variância para a velocidade de corte resultou num valor de P igual a zero, ou seja, valor significativo, assim como o sentido de corte (concordante e discordante) que também apresentou resultado significativo  $p=0$ . A interação entre a velocidade de corte e o sentido de corte também apresentaram valores significativos  $p=0$ .

Na Figura 49 é possível observar todas as interações de rugosidade e parâmetros de corte. A relação da velocidade de corte e velocidade de avanço, no qual nota-se que o valor da rugosidade tende a diminuir com as maiores velocidades de corte 804 e 603 m/min, como ilustrado na Figura 49 no detalhe a. A relação da velocidade de corte com profundidade de usinagem pode ser observada no detalhe b, no qual a profundidade 1 mm nas maiores velocidades de corte apresentam os menores valores de rugosidade.

A relação da velocidade de avanço e profundidade de corte relata que a menor velocidade de avanço e a maior profundidade de usinagem resultam na menor rugosidade (detalhe c).

A relação do sentido de corte concordante e discordante com a velocidade de corte (detalhe d), velocidade de avanço (detalhe e) e profundidade (detalhe f) mostram o mesmo comportamento, evidenciando o sentido de corte discordante como resultado mais satisfatório por apresentar valores de rugosidade ( $R_a$ ) mais baixos. Na maior velocidade de corte, menor velocidade de avanço e profundidade intermediária ocorre a tendência da rugosidade diminuir ainda mais.

Figura 49 - Interação Rugosidade ( $R_a$ ) e parâmetros de corte ( $V_c$ ,  $V_a$  e  $a_p$ ).



Através dos resultados obtidos nesta análise estatística observa-se que o melhor acabamento, ou seja, a menor rugosidade ( $R_a$ ) obtido para o painel MDF no ensaio de fresamento tangencial está relacionada a uma velocidade de 603 m/min, com velocidade de avanço 4 m/min e profundidade de usinagem de 1,5 mm no sentido discordante, como observa-se na Figura 50.

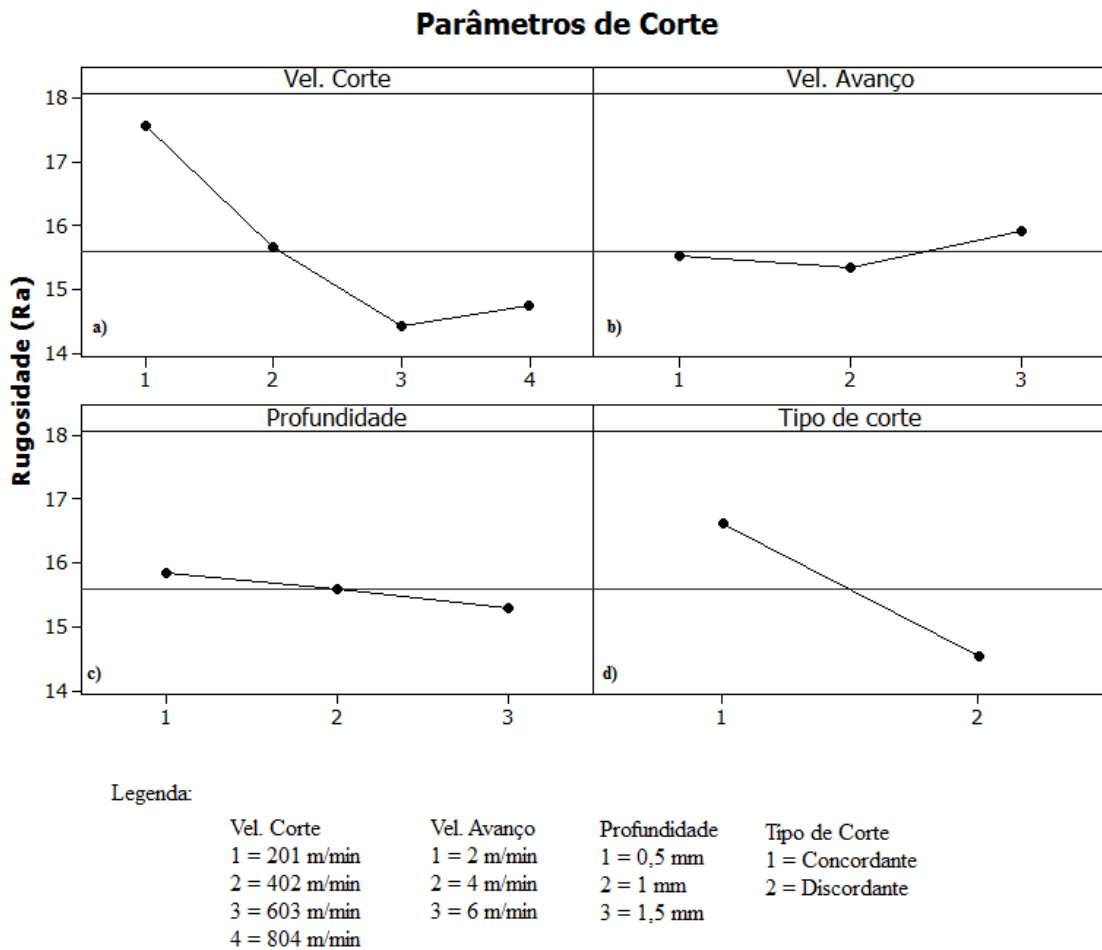
Os resultados alcançados neste trabalho estão compatíveis com Wrublack et al. (2008) relata em um trabalho de avaliação dos parâmetros de corte que o aumento da velocidade de avanço prejudica-se o acabamento superficial, assim como Tibúrcio (2009) que conclui que no fresamento com baixa velocidade de avanço resulta em menores rugosidades.

Valarmathi et al. (2013) usando painéis aglomerados concluíram que velocidade de avanço baixa aliada a velocidade de corte alta resultam em acabamentos mais satisfatórios. Assim como Castro e Gonçalves (2002) que com fresamento de MDF obtiveram rugosidades ( $R_a$ ) menores para velocidades de corte (312 e 217 m/min), além de concluir que para profundidades de 1 a 5 mm apresentam as menores rugosidades.

Goli et. al. (2002) em um ensaio com fresamento periférico das madeiras de *Douglas fir* e Carvalho, observou que no sentido discordante em relação ao concordante, mesmo com valores muito próximos, apresentaram qualidade do fresamento maior. Estes autores ainda afirmam que o corte no sentido discordante é normalmente a melhor técnica de usinagem de madeira maciça

Ao analisar a Figura 50 em relação a rugosidade ( $R_a$ ), percebe-se que as condições nas quais os  $R_a$  foram menores encontram-se, como ilustrado na Figura 50: velocidade de corte item 3 que corresponde a 603 m/min (detalhe a), velocidade de avanço item 2 que corresponde a 4 m/min (detalhe b), profundidade no item 3 que corresponde a 1,5 mm (detalhe c) e sentido de corte item 2 que corresponde a sentido discordante (detalhe d). Os níveis dos fatores mencionados anteriormente foram analisados através da média das respostas de rugosidade, obtendo nestas combinações uma menor variabilidade.

Figura 50 - Média da Rugosidade em relação aos parâmetros de corte.



Fonte: O Autor

## 4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Através do rugosímetro foi possível obter a Rugosidade média (Ra) e a Rugosidade total (Rt) das seis repetições de cada ensaio de fresamento. Os resultados médios referentes ao fresamento tangencial no sentido concordante e discordante estão descritos na Tabela 1.

No fresamento tangencial os valores encontrados para a Rugosidade média (Ra) variaram entre 12 μm e 22 μm no sentido concordante, valores entre 12 μm e 20 μm no sentido discordante. Os valores encontrados para a Rugosidade Total (Rt) variaram entre 115 μm e 220 μm no sentido concordante, valores entre 112 μm e 143 μm no sentido discordante.

No fresamento frontal os valores encontrados para a Rugosidade média (Ra) variaram entre 7 μm e 29 μm e para a Rugosidade Total (Rt) variaram entre 69 μm e 153 μm.

Tabela 1 -- Valores médios referente a Rugosidade média (Ra) e a Rugosidade total (Rt) do fresamento tangencial no sentido concordante e discordante.

Parâmetros			Média Concordante		Média Discordante	
Vc (m/min)	Va (m/min)	ap (mm)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )
201	2	0,5	16,26	156	18,26	143,83
201	2	1	19,8	201,75	15,36	140,16
201	2	1,5	22	215,8	14,4	118,16
201	4	0,5	20,13	220,5	16,7	139,5
201	4	1	20,26	205,8	15,7	128,16
201	4	1,5	14,31	116,66	15,53	126,33
201	6	0,5	19,66	162,7	16,33	132,3
201	6	1	20,73	156	17,56	157,83
201	6	1,5	17,26	165	16,93	139,16
402	2	0,5	18,63	182,75	16,96	150,66
402	2	1	18,01	164,25	14,33	112,33
402	2	1,5	17,1	165	16,93	139,1
402	4	0,5	14,3	140,5	13,4	122,5
402	4	1	17,4	174	13,9	121,83
402	4	1,5	16,18	137,5	14,2	124,16
402	6	0,5	17,8	163,5	14,4	131,33
402	6	1	16,28	176,66	14,2	123,5
402	6	1,5	16,8	133,25	13,4	123
603	2	0,5	13,2	147,8	14,83	132,33
603	2	1	14,7	154,16	13,33	119
603	2	1,5	14,76	153,33	13,32	118,6
603	4	0,5	17,6	146	14,7	131,5
603	4	1	14,6	149	13,26	119
603	4	1,5	12,23	115,33	13,3	114,66
603	6	0,5	16,6	151,5	13,2	127,6
603	6	1	16,73	137,83	12,26	118,83
603	6	1,5	15,6	139,5	14,83	148
804	2	0,5	14,16	166,66	13,53	131,33
804	2	1	15,83	148,83	13,03	109,66
804	2	1,5	13,2	127,33	15,8	131,66
804	4	0,5	17,84	156	14,2	117,5
804	4	1	14,93	128,66	12,8	117,5
804	4	1,5	15,3	134,83	13,8	137,16
804	6	0,5	14,3	145,16	14,5	151,5
804	6	1	14,7	146,33	14,4	124,83
804	6	1,5	17,06	146,33	13,9	118,83

Fonte: (O Autor)

Tabela 2 – Valores médios referente a Rugosidade média (Ra) e a Rugosidade total (Rt) do fresamento frontal.

Parâmetros			Média	
Vc (m/min)	Va (m/min)	ap (mm)	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rt ( $\mu\text{m}$ )
201	2	3	9,8	100,66
201	2	6	13,5	153
201	2	9	14,93	147
201	4	3	11,73	121,83
201	4	6	14,63	127,16
201	4	9	14,33	124
201	6	3	14,76	128,83
201	6	6	16,5	133,16
201	6	9	16,26	134,66
402	2	3	8,03	79,16
402	2	6	11,43	96,16
402	2	9	14,1	131,16
402	4	3	8,96	93,5
402	4	6	13,3	135,83
402	4	9	12,36	110,16
402	6	3	10,4	95,83
402	6	6	29,5	130,33
402	6	9	13,16	123,16
603	2	3	7,9	84
603	2	6	11,03	98
603	2	9	11,66	105
603	4	3	8,13	76,6
603	4	6	12,06	114,66
603	4	9	12,83	115,33
603	6	3	9,8	95,33
603	6	6	11,26	102,5
603	6	9	13,95	125,33
804	2	3	8,25	69,5
804	2	6	10,66	93,5
804	2	9	11,73	111,33
804	4	3	7,9	69
804	4	6	10,4	90
804	4	9	12	109,83
804	6	3	7,5	74,16
804	6	6	10,93	89
804	6	9	13,23	113,5

Fonte: (O Autor)

Observa-se que os valores encontrados para a rugosidade do MDF é superior ao encontrado no fresamento com madeiras, assim como Varasquin et al. (2012) que obtiveram valores médios de Ra de 2,3  $\mu\text{m}$  trabalhando com lixamento do *Eucalyptus grandis*. Pinheiro (2014) no



fresamento de *Pinus elliotti* observou valores de rugosidade média (Ra) dentro de uma faixa de 1,2  $\mu\text{m}$  a 2,8  $\mu\text{m}$ , e valores de rugosidade total (Rt) dentro de uma faixa de 12  $\mu\text{m}$  a 2  $\mu\text{m}$ .

A análise dos resultados está baseada em um estudo estatístico através da análise da variância e teste de Tukey no qual o índice F indica a diferença estatística significativa e a não significativa, além do Coeficiente de Variação (CV).

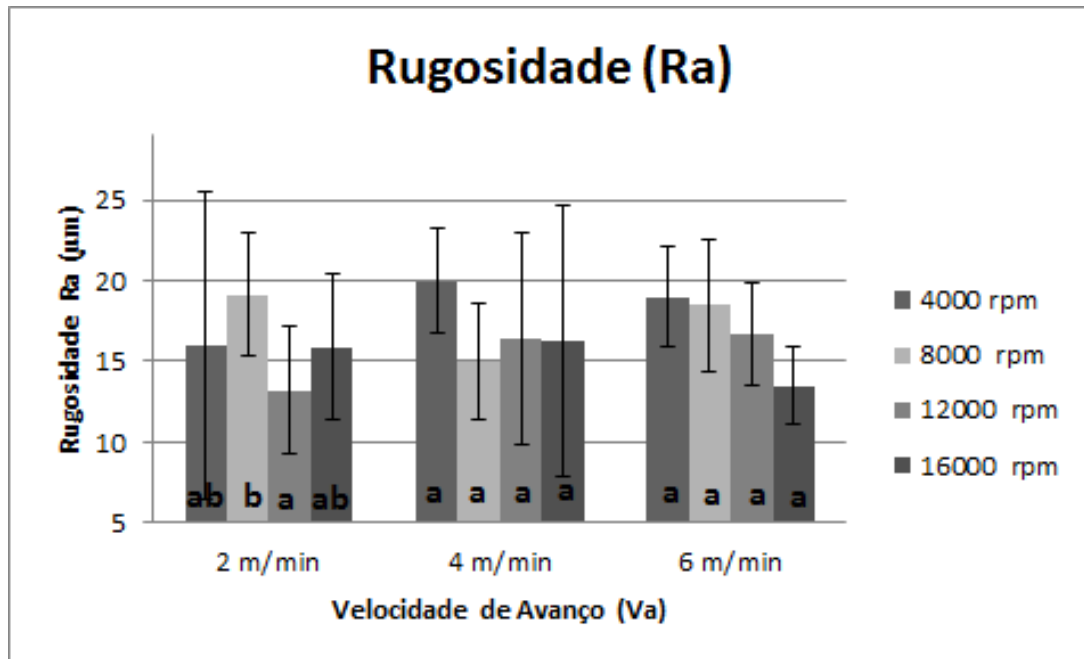
#### **4.2.1 Rugosidades no fresamento tangencial concordante e discordante e no fresamento frontal em relação às velocidades de corte e velocidades de avanço.**

##### 4.2.1.1 Fresamento tangencial concordante

Os valores médios de Rugosidade (Ra) com profundidade de 0,5 mm foram analisados através do teste de Tukey e indicam coeficiente de variação de 17,57%. A velocidade de avanço não apresenta diferença significativa com  $F_{V_a} = 0,43$ ; p-value >5%, assim como na relação entre velocidade de corte e velocidade de avanço com  $F_{V_{cxVa}} = 2,19$ ; p-value >5%. Entre as velocidades de corte há diferenças estatísticas ( $F_{V_c} = 13,34$ ; p-value >5%). Para a Rugosidade total (Rt) e profundidade de 0,5 mm observa-se um coeficiente de variação de 15,96%. Não houve diferenças estatísticas entre as velocidades de avanço ( $F_{V_a} = 0,69$ ; p-value >5%), ou seja, dentro das velocidades de avanço estudadas, o fresamento do MDF para estas condições, não ocorreram diferenças consideráveis. Na relação da velocidade de corte e velocidade de avanço ocorreram diferenças com  $F_{V_{cxVa}} = 6,12$ ; p-value >5%, assim como na velocidade de corte houve diferenças estatísticas significativas ( $F_{V_c} = 6,04$ ; p-value >5%). A estatística para rugosidade média (Ra) é ilustrada na Figura 51 para a profundidade de 0,5 mm, nos quais evidenciam que os menores valores de acabamento superficial para todas as velocidades de avanço se encontram nas maiores velocidades de cortes 603 m/min e 804 m/min.

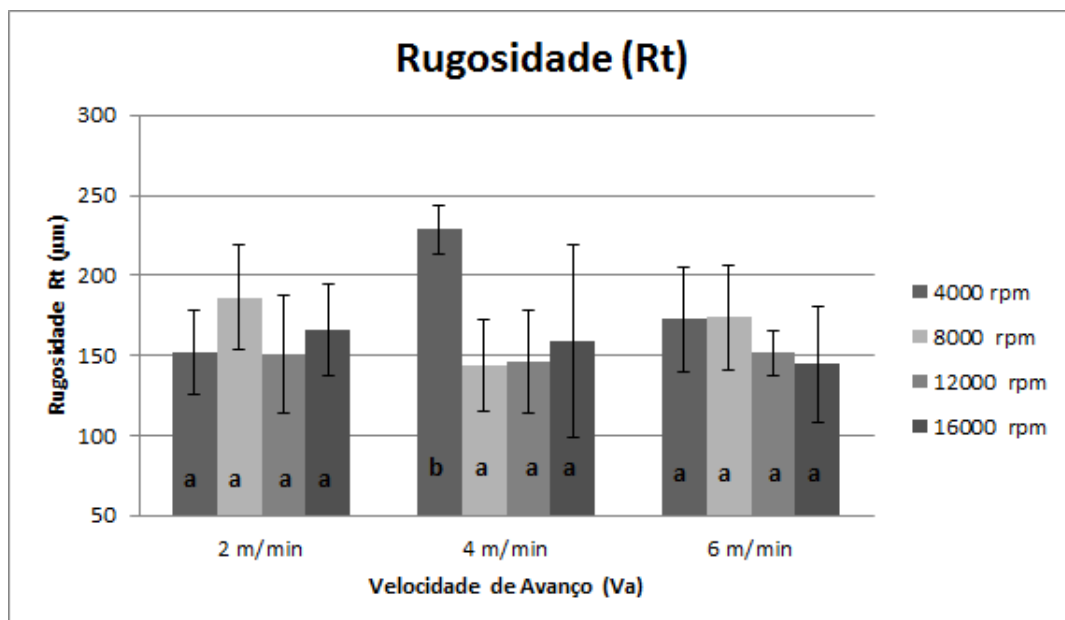
Na Figura 52 é ilustrada a rugosidade total (Rt) para a profundidade de 0,5 mm, no qual evidencia-se que os menores valores de acabamento superficial para todas as velocidades de avanço se encontram nas maiores velocidades de cortes 603 m/min (12000 rpm) e 804 m/min (16000 rpm). Os menores valores de rugosidade foram 13,25  $\mu\text{m}$  em Ra ( $V_c = 603$  m/min e  $V_a = 2$  m/min) e 143,66  $\mu\text{m}$  em Rt ( $V_c = 402$  m/min e  $V_a = 4$  m/min).

Figura 51 - Valores médios das Rugosidades Ra para a profundidade de usinagem de 0,5 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial concordante.



Fonte: (O Autor)

Figura 52 - Valores médios das Rugosidades Rt para a profundidade de usinagem de 0,5 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial concordante.



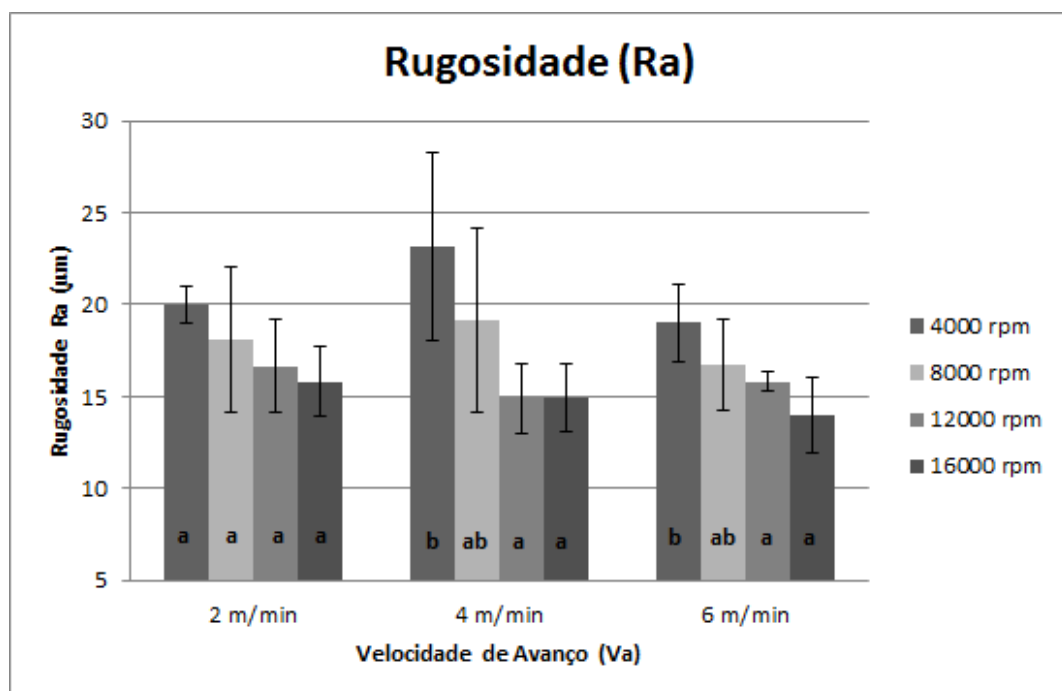
Fonte: (O Autor)

Os valores médios de Rugosidade (Ra) com profundidade de 1,0 mm foram analisados através do teste de Tukey e resultam num coeficiente de variação de 16,38%. A velocidade de

avanço não apresenta diferenças significativas com  $F_{Va} = 1,47$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ , assim como na relação entre velocidade de corte e velocidade de avanço com  $F_{Vc \times Va} = 1,93$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ . Porém entre as velocidades de corte há diferenças estatísticas ( $F_{Vc} = 13,34$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ ). Para a Rugosidade total ( $R_t$ ) e profundidade de 1,0 mm observa-se um coeficiente de variação de 21,26%. Não houve diferenças estatísticas entre as velocidades de avanço ( $F_{Va} = 0,07$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ ), ou seja, dentro das velocidades de avanço estudadas, o fresamento do MDF para estas condições, não ocorreram diferenças consideráveis. Na relação da velocidade de corte e velocidade de avanço não ocorreram diferenças significativas com  $F_{Vc \times Va} = 0,67$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ . Na velocidade de corte houve diferenças estatísticas significativas ( $F_{Vc} = 13,34$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ ).

É apresentado os resultados da rugosidade média ( $R_a$ ) e ( $R_t$ ) em função da usinagem no sentido concordante e com profundidade de usinagem 1 mm. Como ilustrado na Figura 53 houve diferenças significativas na velocidade de corte, no qual os menores valores para a rugosidade superficial ocorrem na maior velocidade de corte 804 m/min (16000 rpm).

Figura 53 - Valores médios das Rugosidades  $R_a$  para a profundidade de usinagem de 1 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial concordante.

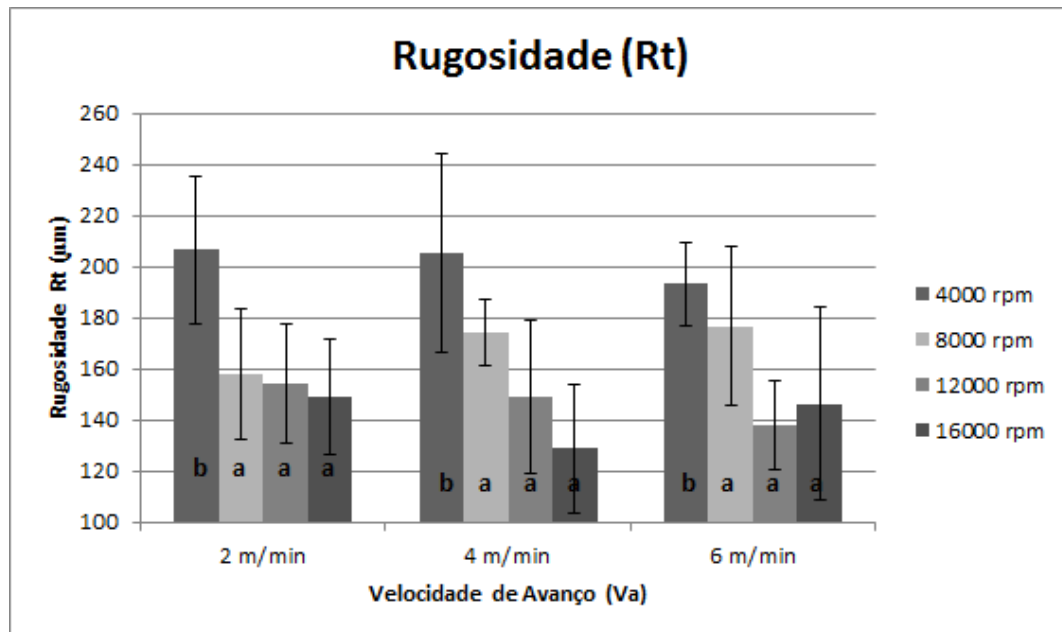


Fonte: (O Autor)

Na rugosidade total é nítido que a maior velocidade de corte corresponde aos menores valores de acabamento superficial, como ilustrado na Figura 54. Os menores valores de

rugosidade foram 14,93  $\mu\text{m}$  em Ra e 128,6  $\mu\text{m}$  em Rt ambos para  $V_c = 804$  m/min e  $V_a = 4$  m/min.

Figura 54 - Valores médios das Rugosidades Ra para a profundidade de usinagem de 1 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial concordante.



Fonte: (O Autor)

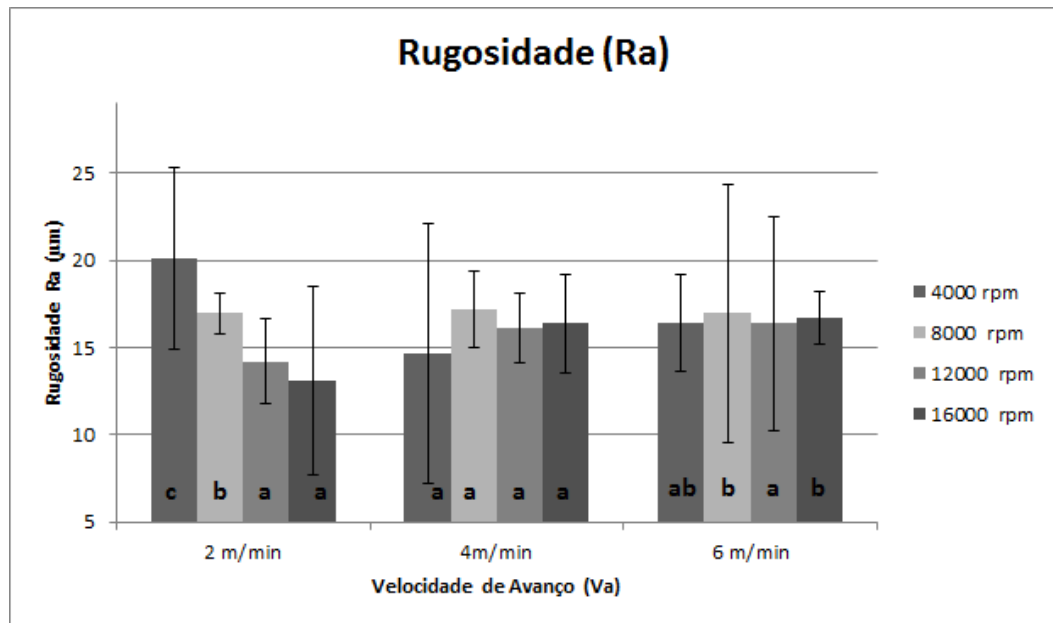
Para a profundidade de 1,5 mm os valores referentes a Rugosidade (Ra) apresentaram um coeficiente de variação de 7,13%. Não observa-se diferença significativa no teste de Tukey para a velocidade de com  $F_{V_a} = 0,008$ ; p-value >5%. Diferente da velocidade de corte ( $F_{V_c} = 9,45$ ; p-value >5%) e da relação entre velocidade de corte e velocidade de avanço com  $F_{V_{cxVa}} = 9,81$ ; p-value >5% que apresentam diferenças estatísticas significativas. Para a Rugosidade total (Rt) observa-se um coeficiente de variação de 21,26%. Ocorre diferenças estatísticas entre as velocidades de avanço ( $F_{V_a} = 5,52$ ; p-value >5%), ou seja, dentro das velocidades de avanço estudadas, o fresamento do MDF para estas condições, não ocorreram diferenças consideráveis. Na relação da velocidade de corte e velocidade de avanço ( $F_{V_{cxVa}} = 5,8$ ; p-value >5%) e na velocidade de corte ( $F_{V_c} = 4,08$ ; p-value >5%) também ocorreram diferenças significativas.

Na Figura 55 observa-se as diferenças estatísticas para a rugosidade média nas velocidades de corte com a tendência do menor resultado de rugosidade ocorrer sempre nas maiores rotações.

Na Figura 56 observa-se a rugosidade total para a profundidade de 1,5 mm, no qual nota-se que não houve diferenças estatísticas significativas na velocidade de avanço de 6 m/min para

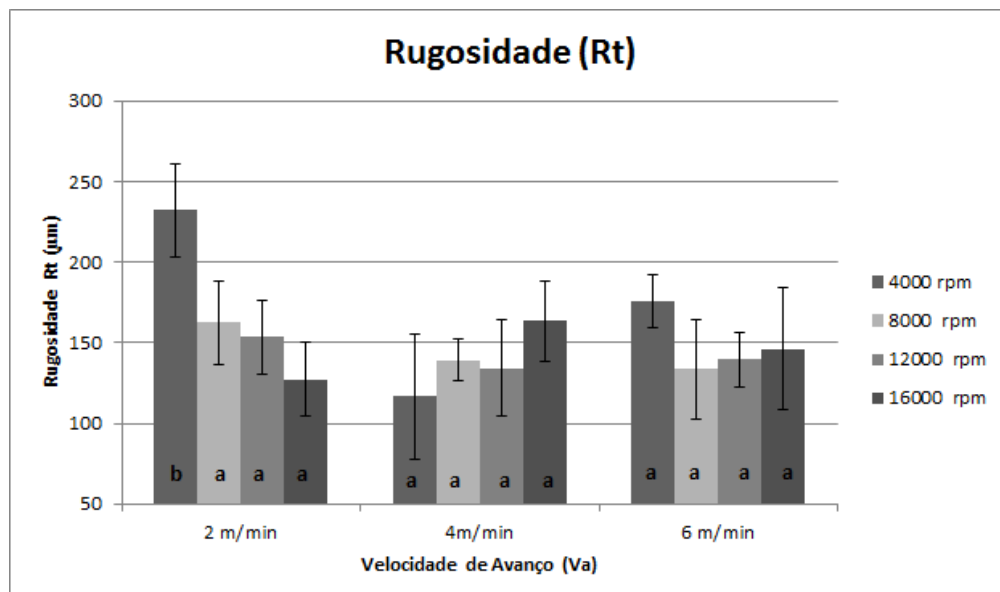
as velocidades de corte 402 m/min (8000 rpm), 603 m/min (12000 rpm) e 804 m/min (16000 rpm). Os menores valores de rugosidade foram 13,13  $\mu\text{m}$  em Ra e 127,33  $\mu\text{m}$  em Rt, ambos para  $V_c = 804$  m/min e  $V_a = 2$  m/min. Na profundidade 1,5 mm há de se considerar que há maior variação da qualidade superficial das peças de MDF.

Figura 55 - Valores médios das Rugosidades Ra para a profundidade de usinagem de 1,5 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial concordante.



Fonte: (O Autor)

Figura 56 - Valores médios das Rugosidades Rt para a profundidade de usinagem de 1,5 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial concordante.



Fonte: (O Autor)

Ao analisar os resultados fica evidente a tendência dos menores valores de rugosidade média (Ra) ocorrer nas maiores velocidades de corte para todas as profundidades. Os menores valores para rugosidade superficial são encontrados na velocidade de corte 603 m/min (12000 rpm) e 804 m/min (16000 rpm), esses resultados são equivalentes aos de Davim et al. (2009) que encontrou melhores rugosidades em 904,5 m/min (18000 rpm) e 527,6 m/min (10500 rpm) que investigou o MDF através do fresamento CNC, porém para profundidade de usinagem de 5 mm. Em Barros (2013) investigou superfície do MDF em fresamento CNC e concluiu que a rugosidade superficial satisfatória encontrada para a velocidade de corte 703 m/min (55960 rpm).

A rugosidade nas diferentes velocidades de avanço demonstra uma tendência de diminuir com maiores rotações, exceto na velocidade de avanço de 6 m/min e profundidade de usinagem 1,5 mm. Isso ocorre porque o acabamento superficial tem maior qualidade em maiores velocidades de corte e baixas velocidades de avanço como esclarece o trabalho de Wrublack et al. (2008), que realizou um levantamento bibliográfico para avaliar os parâmetros de corte no fresamento com foco no acabamento final e custos. Para Savas e Ozay (2007) que investigaram a rugosidade superficial a partir do fresamento tangencial e encontrou as melhores rugosidades superficiais em 3,2 m/min. Assim como em Davim et al. (2009) que concluiu que a menor rugosidade está relacionada as velocidades de avanço: 0,5 m/min e 2,75 m/min. Em Barros (2013) a rugosidade superficial satisfatória foram encontradas para a velocidade de avanço 4 m/min.

Os resultados que demonstraram melhores rugosidades superficiais foram aqueles que relacionam velocidade de corte alta com a velocidade de avanço de 2 m/min e a profundidade de usinagem 0,5 mm ou também a velocidade de avanço de 4 m/min e a profundidade de usinagem 1,5 mm. Deste modo, os resultados desse estudo demonstraram ser coerentes com a literatura.

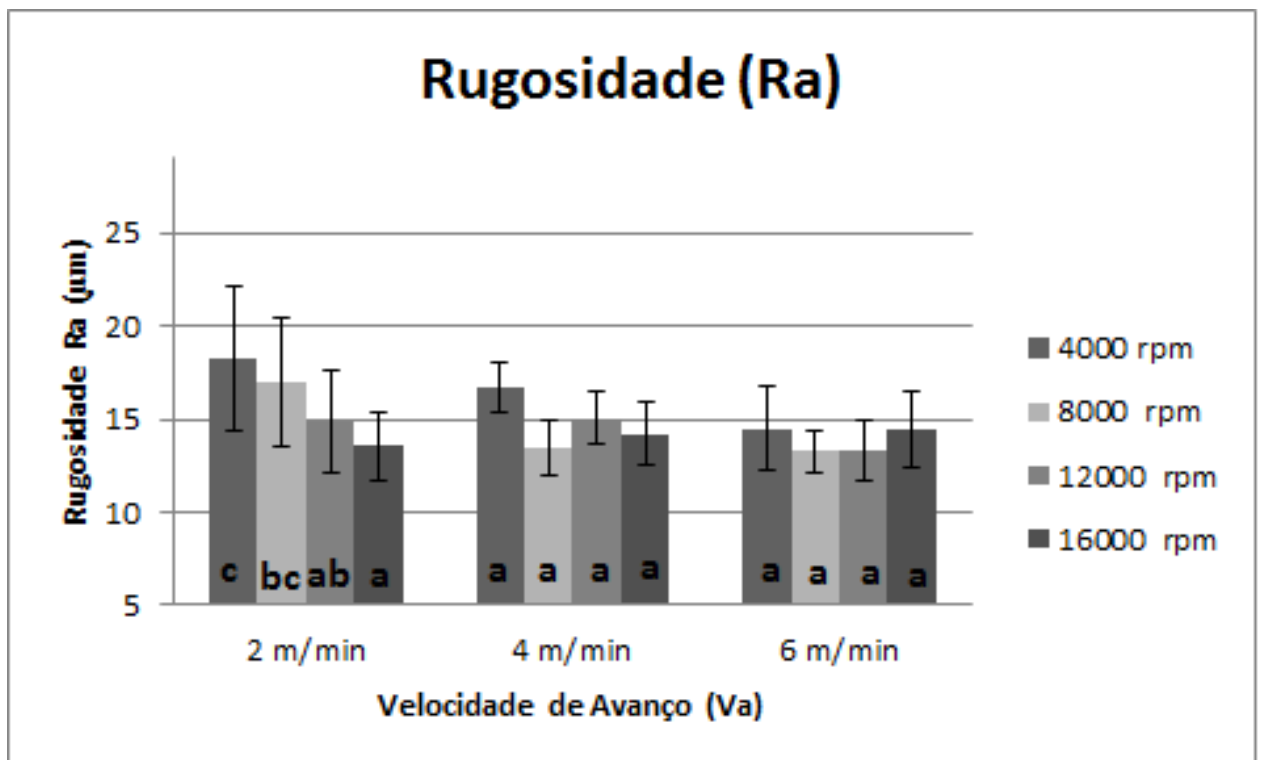
#### 4.2.1.2 Fresamento tangencial Discordante

No fresamento discordante realizou-se o teste de Tukey para a profundidade de 0,5 mm, os valores médios de Rugosidade (Ra) indicam coeficiente de variação de 14,81%. A velocidade de avanço não apresenta diferenças significativas com  $F_{Va} = 2,17$ ; p-value >5%, assim como na relação entre velocidade de corte e velocidade de avanço com  $F_{Vc \times Va} = 1,45$ ; p-value >5%. Porém entre as velocidades de corte há diferenças estatísticas ( $F_{Vc} = 6,77$ ; p-value

>5%). Para o teste de Tukey para a Rugosidade total (Rt) e profundidade de 0,5 mm observa-se um coeficiente de variação de 20,45%. Não houve diferenças estatísticas entre as velocidades de avanço ( $F_{V_a} = 1,63$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ ), assim como na relação da velocidade de corte e velocidade de avanço com  $F_{V_c \times V_a} = 0,54$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ , assim como na velocidade de corte houve diferenças estatísticas significativas ( $F_{V_c} = 0,63$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ ).

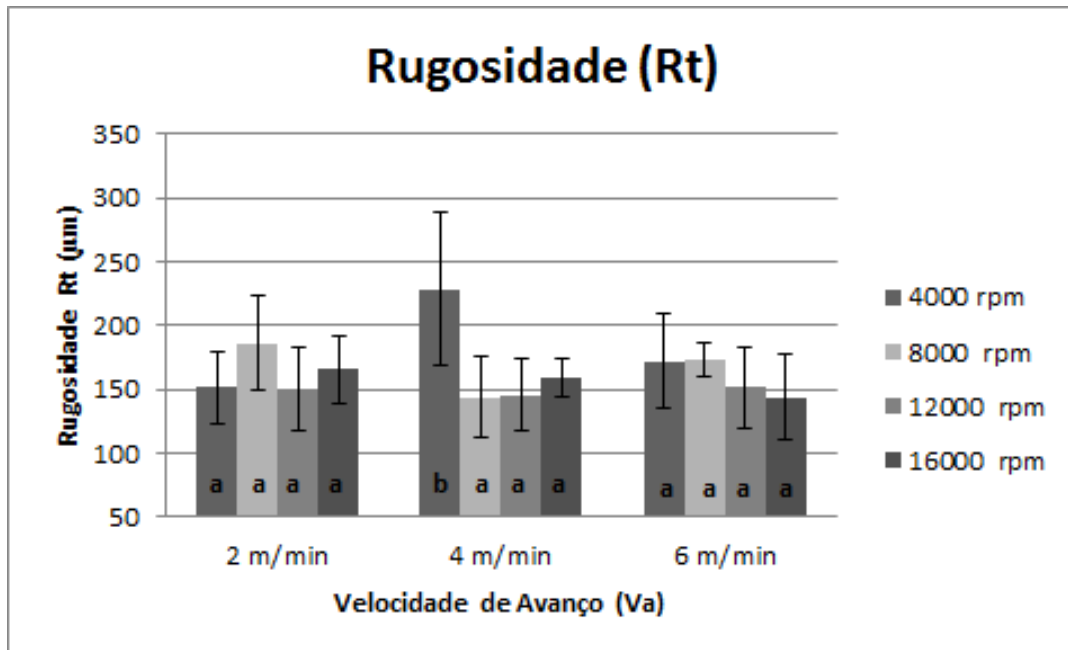
Nas Figuras 57 nota-se que ocorre uma frequência de valores baixos de rugosidade para as velocidades de corte de 8000, 12000 e 16000 rpm, respectivamente 402 m/min, 603 m/min e 804 m/min para a rugosidade média. É possível notar na Figura 58 para a rugosidade total, que nas velocidades de corte 12000 e 16000 rpm, ou seja, 603 m/min e 804 m/min não ocorrem diferenças estatísticas significativas para as velocidades de avanço de 2 e 4 m/min. As Figuras 57 e 58 mostram uma tendência dos menores valores de rugosidade corresponderem a velocidade de avanço 2 m/min

Figura 57 - Valores médios das Rugosidades Ra para a profundidade de usinagem de 0,5 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial discordante.



Fonte: (O Autor)

Figura 58 - Valores médios das Rugosidades Rt para a profundidade de usinagem de 0,5 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial discordante.



Fonte: (O Autor)

Em 8000 rpm (402 m/min) ocorrem valores de rugosidade não aproximados, do mesmo modo que Sen et al. (2013) que estudou os parâmetros no fresamento CNC para fibras reforçadas e obteve como resultado satisfatório de rugosidade a velocidade de corte 402 m/min (8000 rpm). Os menores valores de rugosidade foram 13,53 µm em Ra e 150 µm em Rt, ambos para  $V_c = 804$  m/min e  $V_a = 2$  m/min.

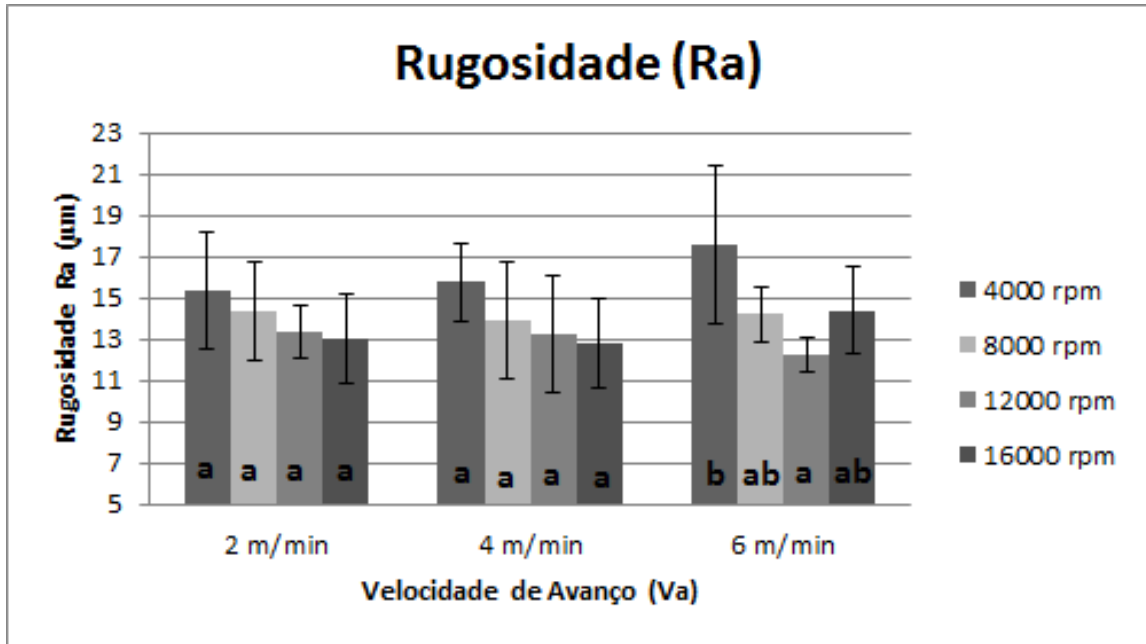
Os valores médios de Rugosidade (Ra) com profundidade de 1,0 mm no fresamento tangencial discordante foram analisados através do teste de Tukey e resultam num coeficiente de variação de 16,46%. A velocidade de avanço apresenta diferenças significativas com  $F_{V_a} = 6,94$ ; p-value >5%. A relação entre velocidade de corte e velocidade de avanço com  $F_{V_c \times V_a} = 0,72$ ; p-value >5% e a velocidade de corte com  $F_{V_c} = 0,59$ ; p-value >5% não apresentam diferenças estatísticas significativas. Para a Rugosidade total (Rt) e profundidade de 1,0 mm observa-se um coeficiente de variação de 21,10%. Não houve diferenças estatísticas entre as velocidades de avanço ( $F_{V_a} = 1,23$ ; p-value >5) e na relação da velocidade de corte e velocidade de avanço com  $F_{V_c \times V_a} = 0,5$ ; p-value >5%. Na velocidade de corte houve diferenças estatísticas significativas ( $F_{V_c} = 3,62$ ; p-value >5%).

Na Figura 59 observa-se que em todas as velocidades de avanço não ocorrem diferenças estatísticas significativas e os menores valores de rugosidade ocorrem na velocidade de avanço



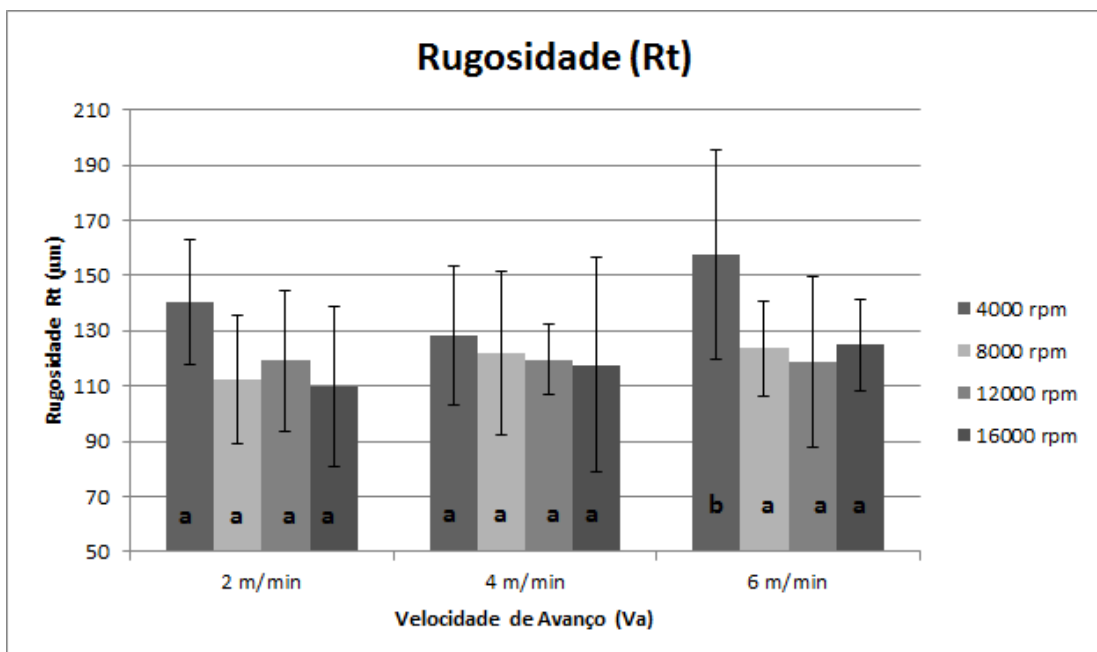
2 m/min. Observa-se uma tendência dos menores valores de rugosidade acontecerem nas velocidades de corte 12000 e 8000 rpm (603 e 201 m/min).

Figura 59 - Valores médios das Rugosidades Ra para a profundidade de usinagem de 1 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial discordante.



Fonte: (O Autor)

Figura 60 - Valores médios das Rugosidades Rt para a profundidade de usinagem de 1 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial discordante.

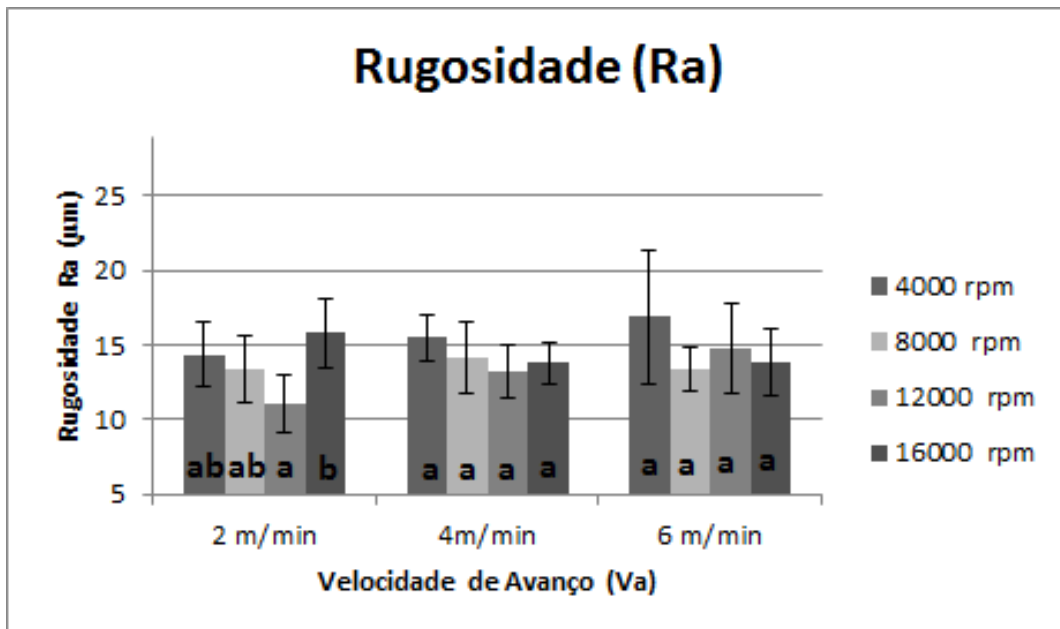


Fonte: (O Autor)

Na Figura 60 observa-se que a velocidade de avanço 2 m/min com os menores valores de rugosidade, somente na velocidade de avanço de 6 m/min que se observa diferença na velocidade de corte de 201 m/min. Os menores valores de rugosidade foram 13  $\mu\text{m}$  em Ra e 109  $\mu\text{m}$  em Rt, ambos para  $V_c = 804$  m/min e  $V_a = 2$  m/min.

Para a profundidade de 1,5 mm os valores referentes a Rugosidade (Ra) apresentaram um coeficiente de variação de 7,13%. Não observa-se diferença significativa no teste de Tukey para a velocidade de avanço com  $F_{V_a} = 0,008$ ; p-value  $>5\%$ . Diferente da velocidade de corte ( $F_{V_c} = 9,45$ ; p-value  $>5\%$ ) e da relação entre velocidade de corte e velocidade de avanço com  $F_{V_{c \times V_a}} = 9,81$ ; p-value  $>5\%$  que apresentam diferenças estatísticas significativas. Para a Rugosidade total (Rt) observa-se um coeficiente de variação de 21,76%. Não ocorrem diferenças estatísticas entre as velocidades de avanço ( $F_{V_a} = 0,64$ ; p-value  $>5\%$ , na relação da velocidade de corte e velocidade de avanço ( $F_{V_{c \times V_a}} = 1,01$ ; p-value  $>5\%$ ) e na velocidade de corte ( $F_{V_c} = 0,13$ ; p-value  $>5\%$ ) também ocorreram diferenças significativas.

Figura 61 - Valores médios das Rugosidades Ra para a profundidade de usinagem de 1,5 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial discordante.

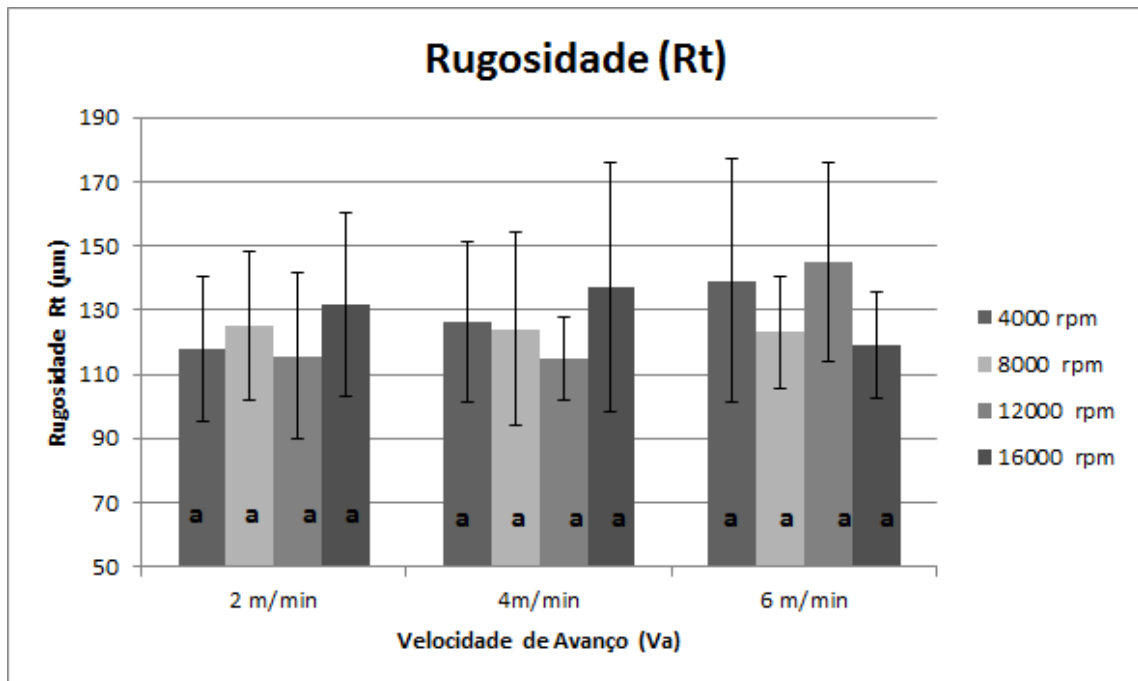


Fonte: (O Autor)

Na Figura 61 é mostrado que as velocidades de avanço não apresentam diferenças estatísticas significativas, somente na velocidade de avanço 2 m/min, no qual também o ocorre o menor valor de rugosidade.

Na Figura 62 fica evidente que as menores rugosidades ocorrem na velocidade de corte 603 m/min (12000 rpm) e 804 m/min (16000 rpm). Os menores valores de rugosidade foram 13,13  $\mu\text{m}$  em Ra e 115  $\mu\text{m}$  em Rt, ambos para  $V_c = 804$  m/min e  $V_a = 2$  m/min.

Figura 62 - Valores médios das Rugosidades Rt para a profundidade de usinagem de 1,5 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento tangencial discordante.



Fonte: (O Autor)

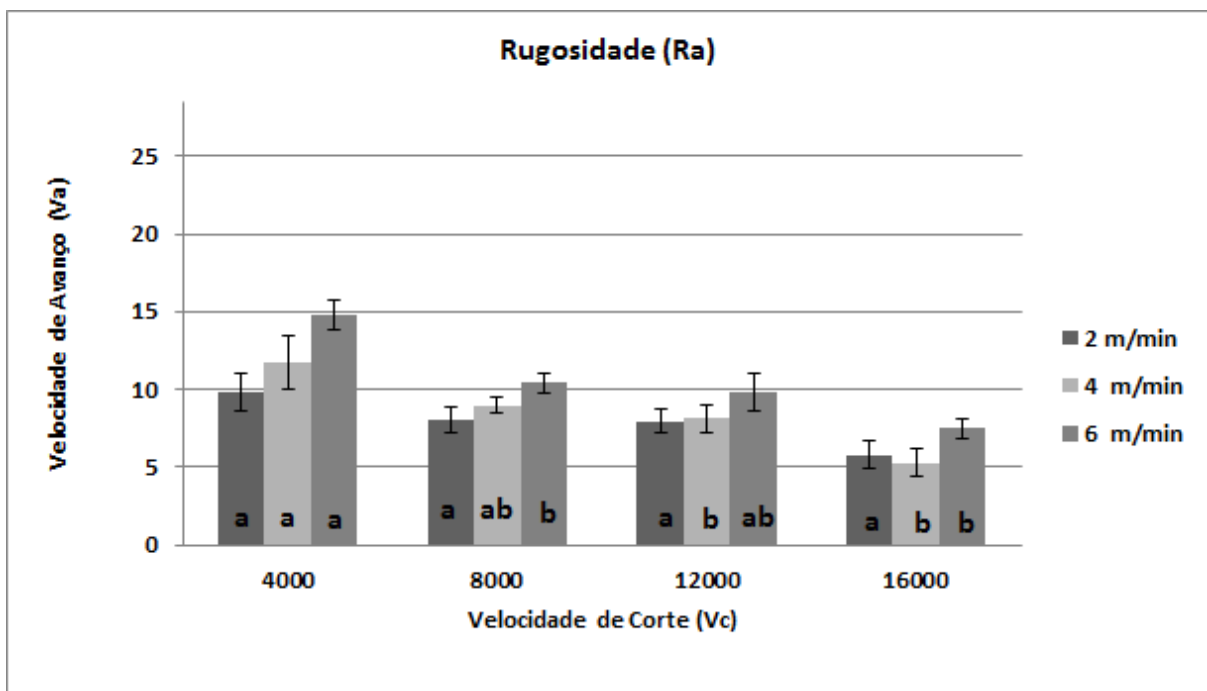
Observa-se que nas três profundidades de usinagem 0,5; 1 e 1,5 mm analisadas ocorrem a tendência dos valores da rugosidade diminuírem com altas velocidades de corte, pois altas rotações fazem com que os dentes da fresa retirem menos cavacos provocando superfícies mais lisas e homogêneas. Porém durante os ensaios foi possível notar que a peça usinada sofreu trepidações durante o processo devido a fixação da peça, resultando em resultados de rugosidade diferentes do esperado para a velocidade de corte 16000 rpm (804 m/min) resultados próximos a Castro e Gonçalves (2000), Davim et al. (2009) e Barros (2013). Aguilera (2011) analisou a rugosidade superficial de MDF através da usinagem variando a velocidade de corte e velocidades de avanço e concluiu que os resultados satisfatórios forma para a velocidade de avanço 5 m/min.

#### 4.2.1.3 Fresamento Frontal

Os resultados médios de rugosidade (Ra) para a profundidade de 3 mm para fresamento frontal. O coeficiente de variação foi de 21,70%. A velocidade de corte obteve resultado significativo estatisticamente ( $F_{RPM} = 28,76$ ; p-value >5%) assim como a velocidade de avanço ( $F_{Va} = 13,31$ ; p-value >5%), diferente da interação entre as velocidades ( $F_{RPM \times Va} = 0,93$ ; p-value >5%). Na Rugosidade (Rt) o coeficiente de variação foi de 26,32%. Não ocorreu diferença significativa na velocidade de avanço com  $F_{Va} = 2,32$ ; p-value >5%, assim como na relação da velocidade de corte e velocidade de avanço com  $F_{Vc \times Va} = 0,61$ ; p-value >5%. Na velocidade de corte observa-se diferenças significativas com  $F_{RPM} = 11,74$ ; p-value >5%.

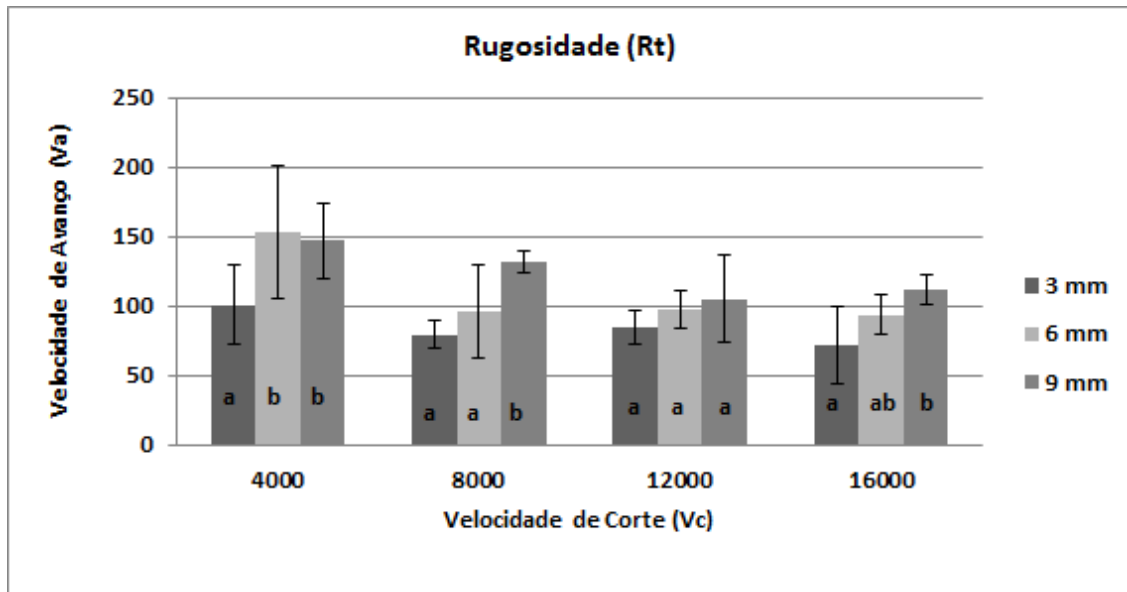
Na profundidade de usinagem de 3 mm não ocorre diferenças estatísticas notáveis dentro das velocidades de corte, como observa-se na Figura 63. Nota-se que com a menor velocidade de avanço 2 m/min a tendência é diminuir os valores de rugosidade, como observa-se também na Figura 64. Os menores valores de rugosidade foram 5,8  $\mu\text{m}$  em Ra e 71  $\mu\text{m}$  em Rt, ambos para  $Vc = 804$  m/min e  $Va = 2$  m/min.

Figura 63 - Valores médios das Rugosidades Ra para a profundidade de usinagem de 3 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento frontal.



Fonte: (O Autor)

Figura 64 - Valores médios das Rugosidades Rt para a profundidade de usinagem de 3 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento frontal.

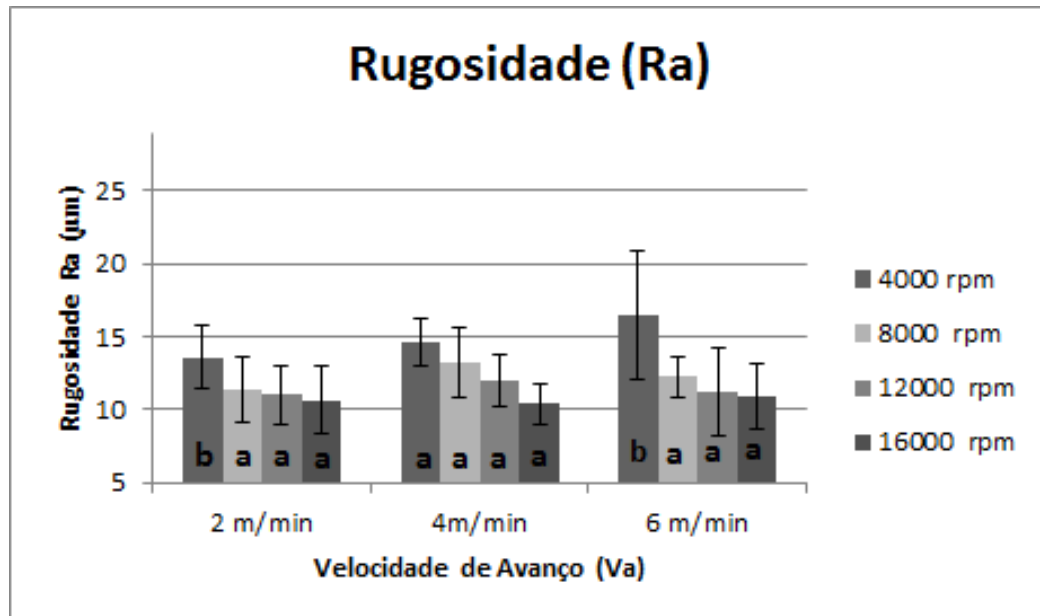


Fonte: (O Autor)

No fresamento frontal realizou-se o teste de Tukey para a profundidade de 6 mm, os valores médios de Rugosidade (Ra) indicam coeficiente de variação de 11,42%. A velocidade de avanço não apresenta diferenças significativas com  $F_{V_a} = 4,03$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ , assim como na velocidade de corte com  $F_{V_{c \times V_a}} = 30,64$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ . Porém entre na relação entre velocidade de corte e velocidade de avanço há diferenças estatísticas ( $F_{V_c} = 2,12$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ ). Para a Rugosidade total (Rt) observa-se um coeficiente de variação de 21,10%. Não houve diferenças estatísticas entre as velocidades de avanço ( $F_{V_a} = 1,23$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ ), assim como na relação da velocidade de corte e velocidade de avanço com  $F_{V_{c \times V_a}} = 0,5$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ . Na velocidade de corte houve diferenças estatísticas significativas ( $F_{V_c} = 0,63$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ ).

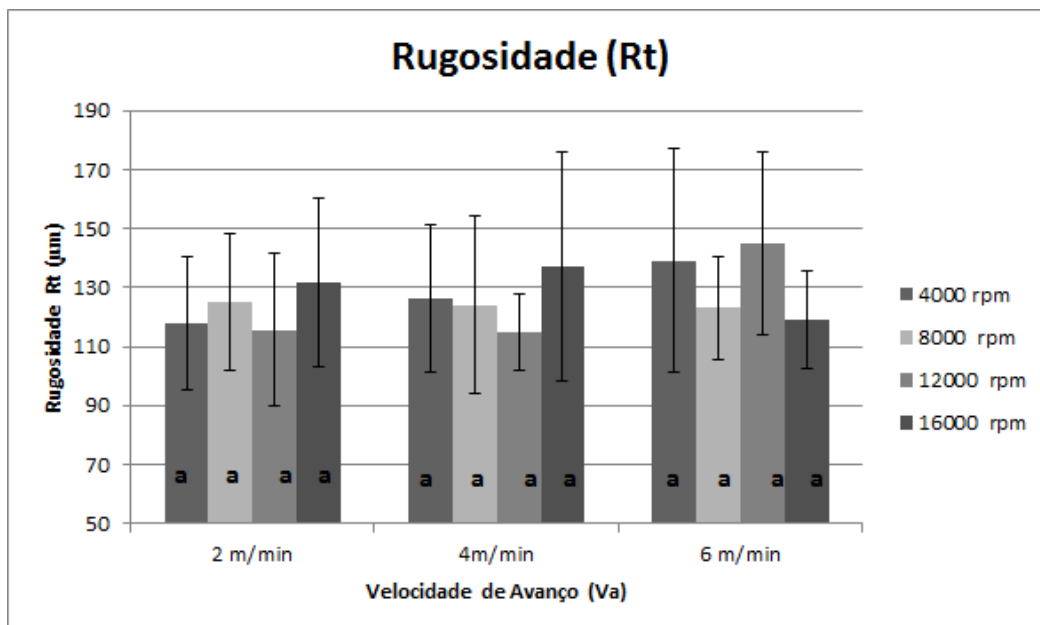
Nas Figura 65 demonstram que o menor valor de rugosidade ocorre na velocidade de corte 804 m/min (16000 rpm). Na velocidade de avanço 2 m/min o menor valor de rugosidade ocorre na velocidade de corte 12000 rpm (603 m/min). Nas velocidades de avanço de 4 m/min e 6 m/min os valores de rugosidade média são aproximados.

Figura 65 - Valores médios das Rugosidades Ra para a profundidade de usinagem de 6 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento frontal.



Fonte: (O Autor)

Figura 66 - Valores médios das Rugosidades Rt para a profundidade de usinagem de 6 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento frontal.



Fonte: (O Autor)

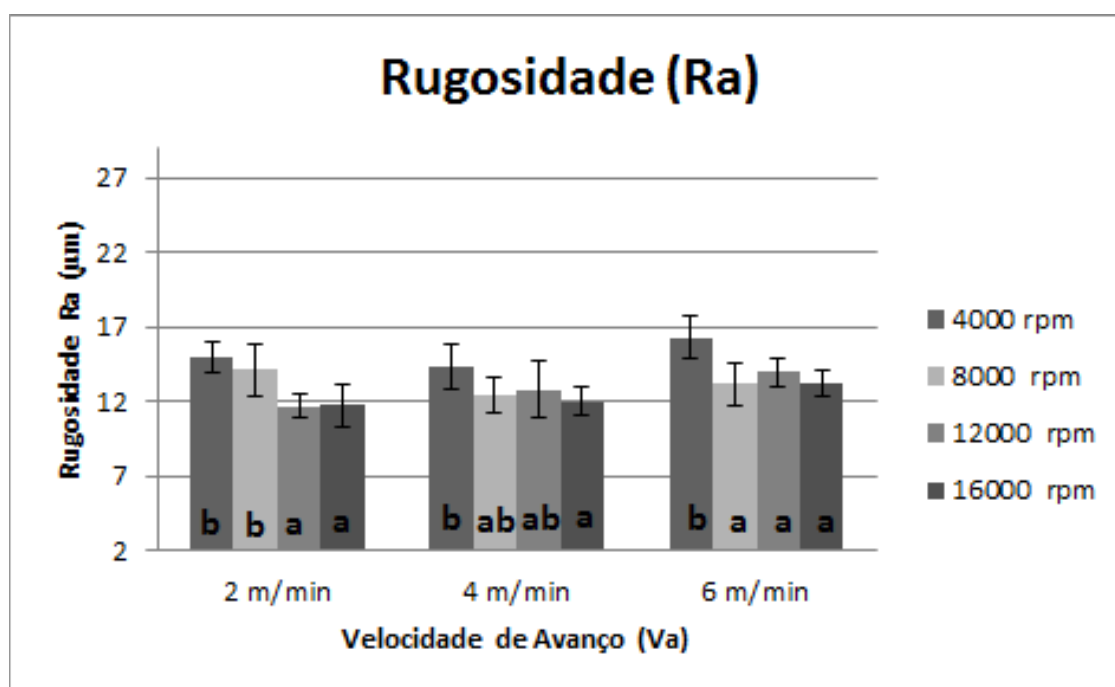
Na Figura 66 observa-se que não ocorrem diferenças estatísticas significativas entre as velocidades de avanço. Observa-se que para as velocidades de corte de 402 e 603 m/min

apresentam as menores rugosidades. Os menores valores de rugosidade foram próximos a 10  $\mu\text{m}$  em Ra e 109  $\mu\text{m}$  em Rt, ambos para  $V_c = 804 \text{ m/min}$  e  $V_a = 2 \text{ m/min}$ .

Os resultados médios de rugosidade para a profundidade de 9 mm apresentaram coeficiente de variação de 9,84%. A velocidade de corte ( $F_{\text{RPM}} = 16,24$ ; p-value >5%) e a velocidade de avanço ( $F_{V_a} = 6,36$ ; p-value >5%) demonstraram resultado significativo estatisticamente, já a relação entre as velocidades ( $F_{V_a \times \text{RPM}} = 9,84$ ; p-value >5%) não demonstram diferenças estatísticas significativas. Para a Rugosidade total (Rt) observa-se um coeficiente de variação de 21,76%. Não houve diferenças estatísticas entre as velocidades de avanço ( $F_{V_a} = 0,64$ ; p-value >5%), na relação da velocidade de corte e velocidade de avanço com  $F_{V_c \times V_a} = 0,13$ ; p-value >5% e na velocidade de corte  $F_{V_c} = 1,01$ ; p-value >5%.

A Figura 67 mostra que as menores rugosidades ocorrem em 16000 e 12000 rpm (804 e 603 m/min). Os valores de rugosidade nas velocidades de avanço são próximos, porém a velocidade de avanço de 2 m/min corresponde aos menores valores da rugosidade. Os menores valores de rugosidade foram próximos a 11  $\mu\text{m}$  em Ra e próximos a 115  $\mu\text{m}$  em Rt, ambos para  $V_c = 804 \text{ m/min}$  e  $V_a = 2 \text{ m/min}$ .

Figura 67 - Valores médios das Rugosidades Ra para a profundidade de usinagem de 9 mm em relação a velocidade de corte e velocidade de avanço no fresamento frontal.



Fonte: (O Autor)

Observa-se que nas três profundidades de usinagem 3, 6 e 9 mm analisadas ocorrem a tendência dos valores da rugosidade diminuírem com altas velocidades de corte, também foi possível notar que a menor velocidade de avanço proporciona menores valores de rugosidade, pois altas rotações fazem com que os dentes da fresa retirem menos cavacos provocando superfícies mais lisas e homogêneas. A velocidade de avanço de 2 m/min é a menor que em comparação com os resultados encontrados por Castro e Gonçalves (2000) 2,90 m/min são próximos. Assim como Savas e Ozay (2007) encontrou a menor rugosidade para a velocidade de avanço de 3,2 m/min. A melhor condição de fresamento para o MDF nas três profundidades de usinagem seria velocidade de avanço 2 m/min e velocidade de corte de 804 m/min (16000 rpm).

#### 4.2.1.4 Discussões sobre a rugosidade em relação a velocidades de corte e velocidades de avanço.

Observa-se que a análise da rugosidade superficial para os parâmetros velocidade de corte e velocidade de avanço no sentido concordante, sentido discordante e para direção frontal apresentaram a tendência dos melhores resultados serem nas maiores velocidades de corte e menores velocidades de avanço.

Assim como ocorre em Eyma (2004) que através do fresamento CNC de madeiras ressaltou que os resultados mais satisfatórios em relação a rugosidade superficiais são aqueles relacionados a maiores velocidades de corte. Valarmathi et al. (2013) concluiu ao investigar usinagem de aglomerados que altos valores de velocidade de corte demonstram resultados mais satisfatórios. Braga et al. (2014) encontrou em sua investigação com madeira os melhores resultados de qualidade da superfície com as maiores velocidades de corte entre 1131 m/min e 1234 m/min.

Em altas velocidades de corte a rugosidade superficial apresenta melhores resultados pois a ferramenta passa por várias vezes na superfície usinada. Também é possível observar a formação de cavaco contínuos, ou seja, a usinagem está ocorrendo de forma continua com menor impacto máquina-peça.

Por se tratar do MDF que tem em sua constituição fibras compactadas a formação dos cavacos descontínuos provoca uma superfície com aspereza, assim as velocidades de corte altas apresentam melhores resultados de acabamento.

Com valores altos de velocidade de corte cada dente da fresa retira menos material, ocasionando menos vibrações e nas mesmas condições de velocidade de avanço proporciona



menos superfícies rugosas. Portanto, com a menor velocidade de avanço e a maior velocidade de corte a superfície do MDF tende a ser menos rugosa, bem como os resultados demonstraram nesse estudo.

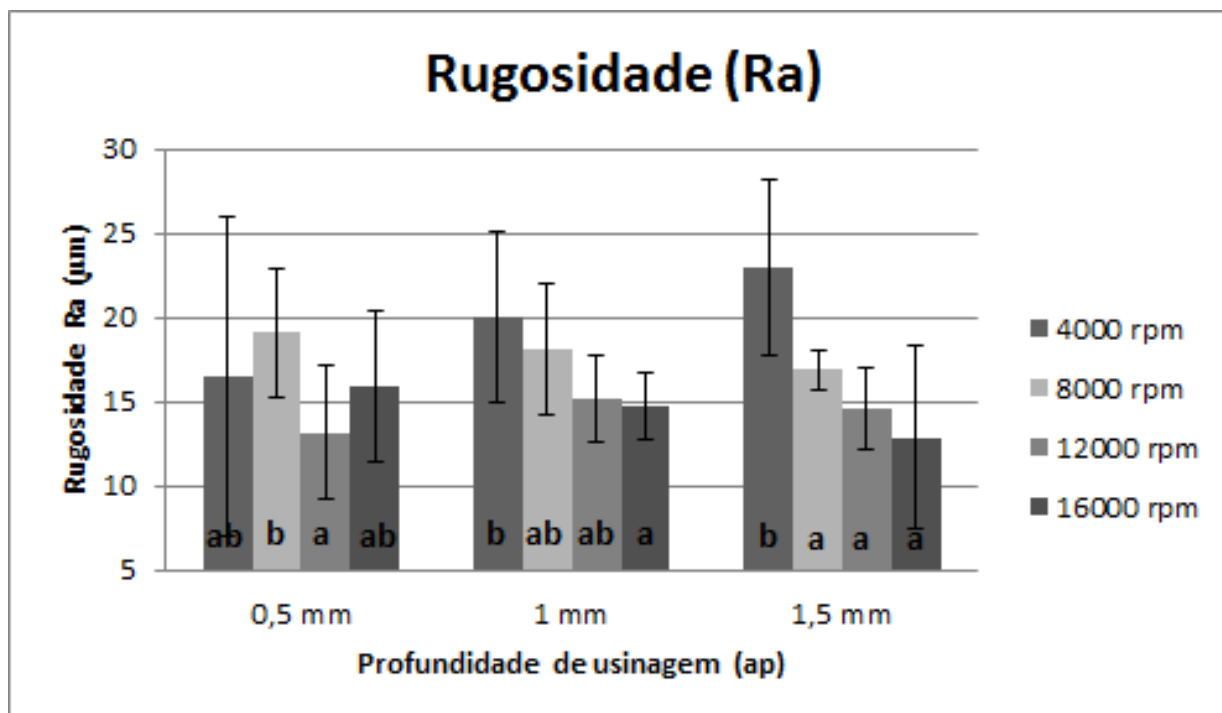
#### **4.2.2 Rugosidades para o fresamento tangencial concordante, discordante e fresamento frontal em relação a velocidades de corte e profundidade de usinagem.**

##### 4.2.2.1 Fresamento tangencial Concordante

O teste de Tukey para a rugosidade ( $R_a$ ) nas profundidades de usinagem ( $a_p$ ) 0,5 mm, 1 mm e 1,5 mm na velocidade de avanço 2 m/mim resultou em um coeficiente de variação de 16,34%. A profundidade de usinagem não obteve resultado significativo estatisticamente ( $F_{a_p} = 0,44$ ; p-value >5%), diferente da velocidade de corte ( $F_{V_c} = 11,95$ ; p-value >5%) e da relação entre a velocidade de corte e profundidade de usinagem ( $F_{V_c \times a_p} = 2,56$ ; p-value >5%). Para a Rugosidade ( $R_t$ ) o coeficiente de variação foi de 18,15% e apresentou resultados significativos no Tukey para profundidade de usinagem  $F_{a_p} = 5,12$ ; p-value >5% e para a relação entre as velocidades  $F_{V_c \times a_p} = 3,81$ ; p-value >5%. Já na velocidade de corte  $F_{V_c} = 1,95$ ; p-value >5% não foi estatisticamente significativo.

Observa-se na Figura 68 que a rugosidade entre as velocidades de corte nas 3 profundidades ( $a_p$ ) não apresentam diferenças estatísticas, salientando menores valores de rugosidade na profundidade de 1,5 mm. Para 0,5 mm, 1 mm e 1,5 mm os menores valores de rugosidade ocorrerem nas maiores rotações 12000 rpm e 16000 rpm (603 m/min e 804 m/min respectivamente). O comportamento da rugosidade nas profundidades 1 mm e 1,5 mm seguem uma ordem decrescente com o aumento da velocidade de corte. Já para a menor profundidade apresenta comportamento instável em relação ao aumento das rotações. Os menores valores de rugosidade foi 12,9  $\mu\text{m}$  em  $R_a$  e 127  $\mu\text{m}$  em  $R_t$ , ambos para  $V_c = 804$  m/min e  $a_p = 1,5$  mm.

Figura 68 - Rugosidade média Ra das diferentes profundidades de usinagem ( $a_p$ ) para a velocidade de avanço 2 m/min no sentido concordante.

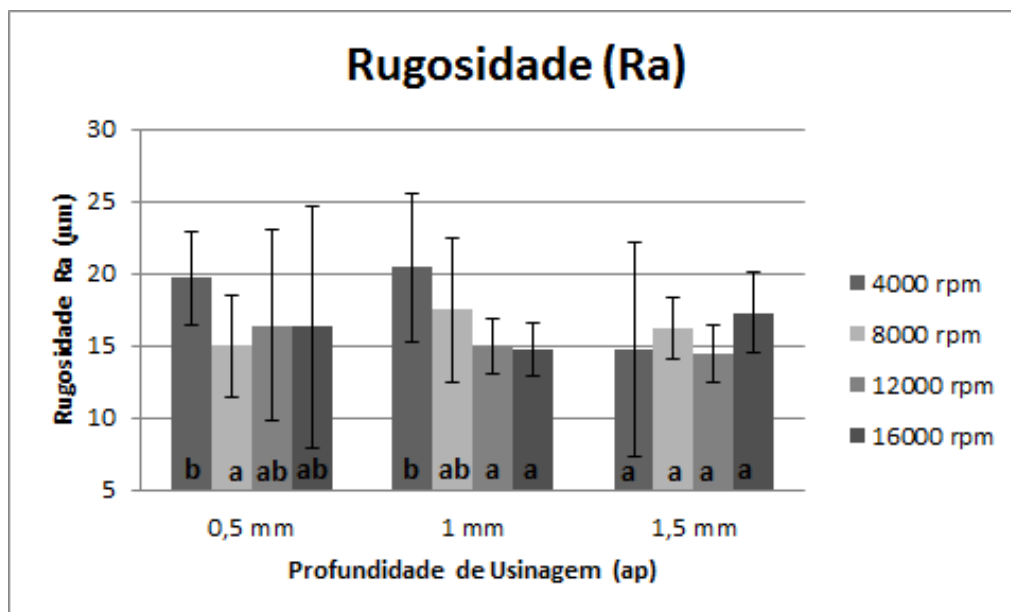


Fonte: (O Autor)

O teste de Tukey para a rugosidade (Ra) nas profundidades de usinagem ( $a_p$ ) 0,5 mm, 1 mm e 1,5 mm na velocidade de avanço 4 m/min resultou em um coeficiente de variação de 13,13%. A profundidade de usinagem não obteve resultado significativo estatisticamente ( $F_{a_p} = 1,60$ ; p-value >5%), diferente da velocidade de corte ( $F_{V_c} = 19,19$ ; p-value >5%) e da relação entre a velocidade de corte e profundidade ( $F_{V_c \times a_p} = 3,37$ ; p-value >5%). Para a Rugosidade (Rt) o coeficiente de variação foi de 18,51% e apresentou resultados significativos no Tukey para profundidade de usinagem  $F_{a_p} = 7,6$ ; p-value >5%, para a relação entre as velocidade e profundidade  $F_{V_c \times a_p} = 7,08$ ; p-value >5%, assim como na velocidade de corte  $F_{V_c} = 1,60$ ; p-value >5%.

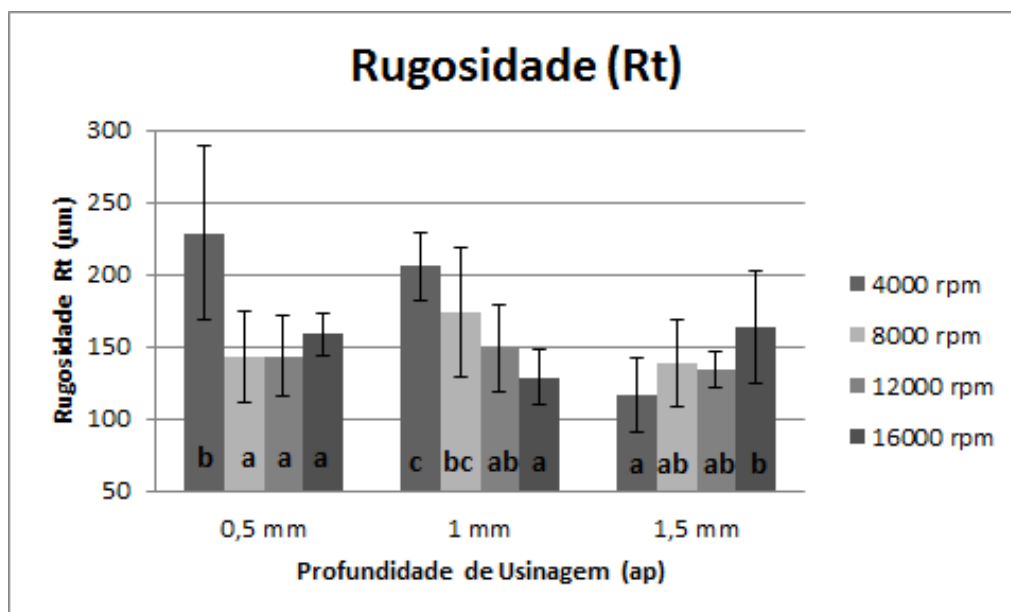
Observa-se na Figura 69 que os menores valores de Ra ocorrem na profundidade de 1,5 mm, assim como na Rt, observada na Figura 70. Também é possível notar que as menores rugosidades ocorrem nas velocidades de corte de 603 e 804 m/min. Os menores valores de rugosidades foram próximo a 16  $\mu\text{m}$  em Ra e 128,66  $\mu\text{m}$  em Rt, ambos para  $V_c = 804$  m/min e  $a_p = 1$  mm.

Figura 69 – Rugosidade média Ra das diferentes profundidades de usinagem (ap) para a velocidade de avanço 4 m/min no sentido concordante.



Fonte: (O Autor)

Figura 70 – Rugosidade Total Rt das diferentes profundidades de usinagem (ap) para a velocidade de avanço 4 m/min no sentido concordante.



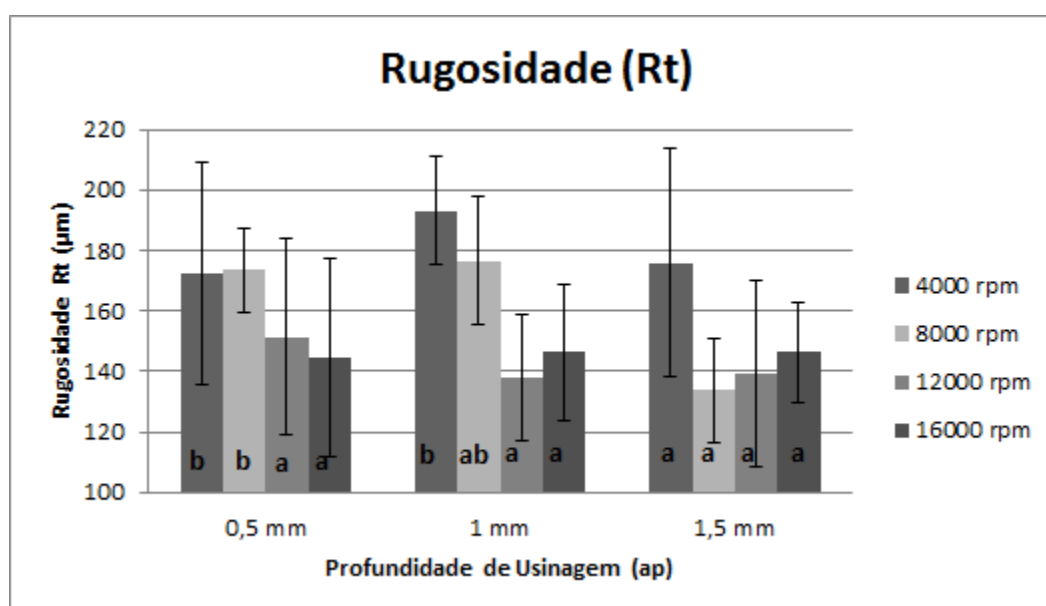
Fonte: (O Autor)

O teste de Tukey para a rugosidade (Ra) nas profundidades de usinagem (ap) 0,5 mm, 1 mm e 1,5 mm na velocidade de avanço 6 m/min resultou em um coeficiente de variação de 13,27%. A profundidade de usinagem ( $F_{ap} = 0,66$ ; p-value >5%) e a relação entre a velocidade de corte e profundidade ( $F_{V_c \times ap} = 3,89$ ; p-value >5%) não obteve resultado significativo

estatisticamente, diferente da velocidade de corte ( $F_{Vc} = 1,60$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ ). Para a Rugosidade ( $R_t$ ) o coeficiente de variação foi de 18,19% e não apresentou resultados significativos no Tukey para profundidade de usinagem  $F_{ap} = 1,72$ ;  $p\text{-value} > 5\%$  e para a relação entre a velocidade de corte e profundidade  $F_{Vc \times ap} = 1,25$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ . Já na velocidade de corte foi estatisticamente significativo  $F_{Vc} = 6,54$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ . Os menores valores de rugosidade foi  $15,05 \mu\text{m}$  em  $R_a$  e  $127,33 \mu\text{m}$  em  $R_t$ , ambos para  $Vc = 804 \text{ m/min}$  e  $ap = 0,5 \text{ mm}$ .

Observa-se na Figura 71 observa-se que os menores valores de rugosidade ocorrem na profundidade de 1,5 mm. Há uma tendência dos menores valores de rugosidade estarem relacionadas com as menores velocidades de corte. Observa-se também que as menores rugosidades ocorrem na profundidade de 1,5 mm.

Figura 71 - Rugosidade total  $R_t$  das diferentes profundidades de usinagem ( $ap$ ) para a velocidade de avanço 6 m/min no sentido concordante.



Fonte: (O Autor)

Na investigação de Goli et al. (2009) no fresamento tanto concordante e discordante da madeira de Douglas Fir em profundidades de usinagem de 0,5 ou 1,5 mm e não encontrou diferenças significativas entre as profundidades de usinagem.

Com maiores valores de profundidade de usinagem, maior será a carga sobre a ferramenta o que provoca mais vibrações e regiões rugosas na peça. Outra desvantagem de altos valores de profundidade de usinagem, que a carga sobre a ferramenta pode ocasionar flexão na fresa, o que provoca paredes inclinadas ao invés de paredes eriais formando ondulações um acabamento não adequado.

Valores altos de velocidade de corte propiciam menos vibrações e menor retirada de material pelos dentes da fresa. Deste modo, velocidade de corte alta e profundidade de usinagem baixo resultam num corte eficiente.

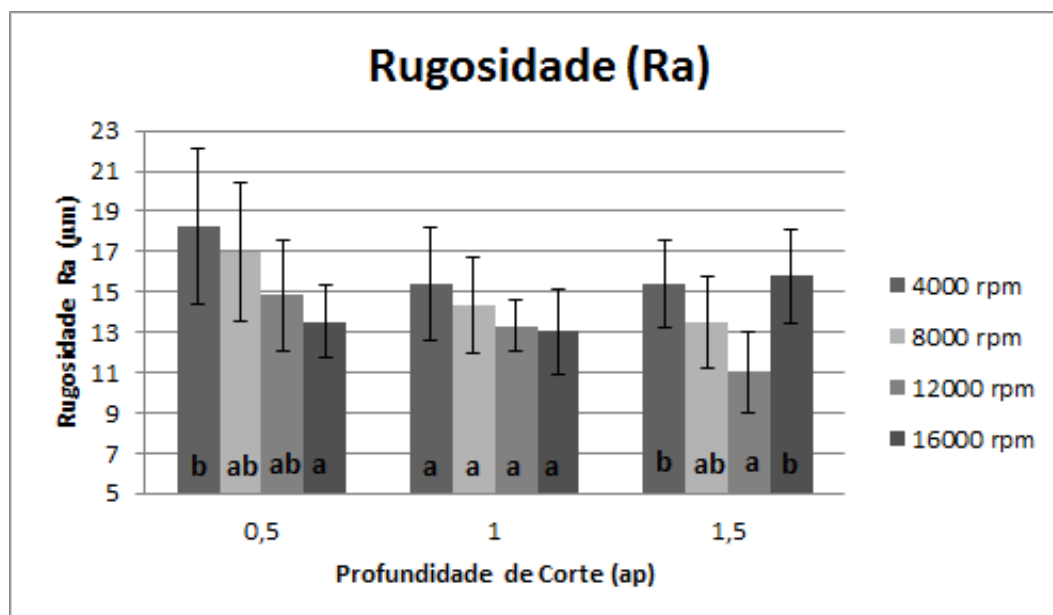
A velocidade de avanço deve ter valores baixos para um bom desempenho no acabamento, pois deste modo diminui o esforço na ferramenta, diminui a vibração evitando as ranhuras na superfície da madeira, assim como os resultados no trabalho de Almeida (2013) no fresamento para madeiras de pinus e eucalipto com profundidade de usinagem 1 mm e velocidade de avanço de 3 m/min. Bem como Chen et al. (2012) que no estudo sobre as vibrações da ferramenta de corte na rugosidade superficial através da análise do espectro singular (SSA) concluiu que as menores profundidades de usinagem ocasionam menores vibrações.

#### 4.2.2.2 Fresamento tangencial Discordante

No fresamento discordante realizou-se o teste de Tukey para a velocidade de 2 m/min, os valores médios de Rugosidade (Ra) indicam coeficiente de variação de 20,43%. A profundidade de usinagem apresenta resultado significativo estatisticamente ( $F_{ap} = 3,76$ ; p-value >5%), assim como na velocidade de corte ( $F_{RPM} = 3,76$ ; p-value >5%) diferente da relação entre a profundidade e velocidade de corte ( $F_{ap \times RPM} = 1,68$ ; p-value >5%) que não demonstra diferenças estatísticas significativas. Para o teste de Tukey para a Rugosidade total (Rt) observa-se um coeficiente de variação de 20,61%. Não houve diferenças estatísticas entre as velocidades de corte  $F_{Vc} = 1,35$ ; p-value >5%, assim como na relação da velocidade de corte e profundidade de usinagem com  $F_{Vc \times ap} = 0,75$ ; p-value >5%. Na profundidade de usinagem houve diferenças estatísticas significativas ( $F_{ap} = 3,35$ ; p-value >5%). Os menores valores de rugosidade foram próximos a 13  $\mu\text{m}$  em Ra e 109,66  $\mu\text{m}$  em Rt, ambos para  $Vc = 804$  m/min e  $ap = 1$  mm.

É possível observar na Figura 72 os valores de rugosidade têm a tendência de diminuir a medida que a velocidade de corte aumenta. Porém observa-se que isso não ocorreu na profundidade de usinagem 1,5 mm, pois ocorreram mais trepidações na peça durante a usinagem que modificou o resultado esperado. Na profundidade 1 mm ocorreram os menores valores de rugosidade (Ra próximos a 13  $\mu\text{m}$  e Rt próximos a 110  $\mu\text{m}$ ).

Figura 72 – Rugosidade média Ra das diferentes profundidades de usinagem ( $a_p$ ) para a velocidade de avanço 2 m/min no sentido discordante.

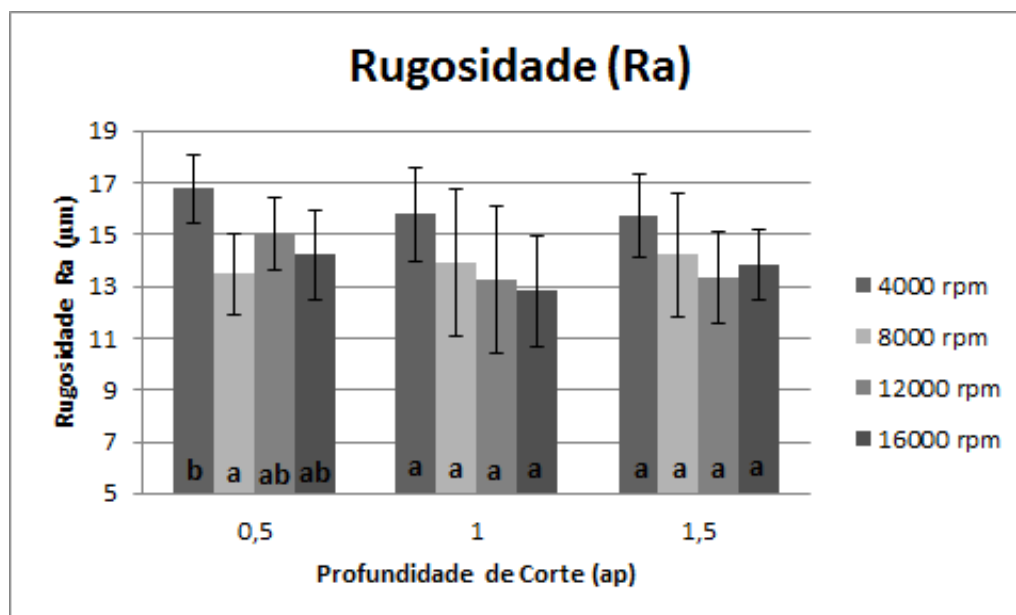


Fonte: (O Autor)

Realizou-se o teste de Tukey para a velocidade de 4 m/min, os valores médios de Rugosidade (Ra) indicam coeficiente de variação de 13,75%. A profundidade de usinagem apresenta resultado significativo estatisticamente ( $F_{ap} = 6,23$ ; p-value >5%). Já a velocidade de corte ( $F_{RPM} = 1,37$ ; p-value >5%) e a relação entre a profundidade e velocidade de corte ( $F_{ap \times RPM} = 0,56$ ; p-value >5%) não demonstra diferenças estatísticas significativas. Para o teste de Tukey para a Rugosidade total (Rt) observa-se um coeficiente de variação de 23,37%. Não houve diferenças estatísticas entre as velocidades de corte  $F_{Vc} = 0,57$ ; p-value >5%, assim como na relação da velocidade de corte e profundidade de usinagem com  $F_{Vc \times ap} = 0,42$ ; p-value >5% e na profundidade de usinagem  $F_{ap} = 0,13$ ; p-value >5%.

Na Figura 73 mostra que dentro das profundidades não apresentam diferenças estatísticas significativas. Os valores de rugosidade têm a tendência de diminuir a medida que a velocidade de corte aumenta. O menor valor de rugosidade ocorreu na velocidade de corte de 16000 rpm (804 m/min) e profundidade de usinagem 1 mm com Ra de 12,8 μm e Rt de 119,5 μm. Os menores valores de rugosidade foi 12,8 μm em Ra e 117,5 μm em Rt, ambos para  $V_c = 804$  m/min e  $a_p = 1$  mm.

Figura 73 – Rugosidade média Ra das diferentes profundidades de usinagem (ap) para a velocidade de avanço 4 m/min no sentido discordante.



Fonte: (O Autor)

Os valores médios de Rugosidade (Ra) através do teste de Tukey para a velocidade de 6 m/min, indicam coeficiente de variação de 13,37%. Para a velocidade de corte obteve resultado significativo estatisticamente ( $F_{RPM} = 0,89$ ; p-value >5%), a relação entre a profundidade de usinagem e velocidade de avanço ( $F_{ap \times RPM} = 0,32$ ; p-value >5%) e na profundidade de usinagem ( $F_{ap} = 1,62$ ; p-value >5%) não demonstram diferenças estatísticas significativas. Para o teste de Tukey para a Rugosidade total (Rt) observa-se um coeficiente de variação de 20,59%. Não houve diferenças estatísticas entre as velocidades de corte  $F_{Vc} = 0,05$ ; p-value >5%, assim como na relação da velocidade de corte e profundidade de usinagem com  $F_{Vc \times ap} = 1,36$ ; p-value >5% e na profundidade de usinagem  $F_{ap} = 1,38$ ; p-value >5%.

Os valores de rugosidade são bastante equivalentes e demonstram a leve tendência de diminuir em todas as velocidades de avanço a medida em que a velocidade de corte aumenta. Os menores valores de rugosidade ocorrem na profundidade 1 mm com Ra igual 12,26 µm e Rt igual a 118 µm.

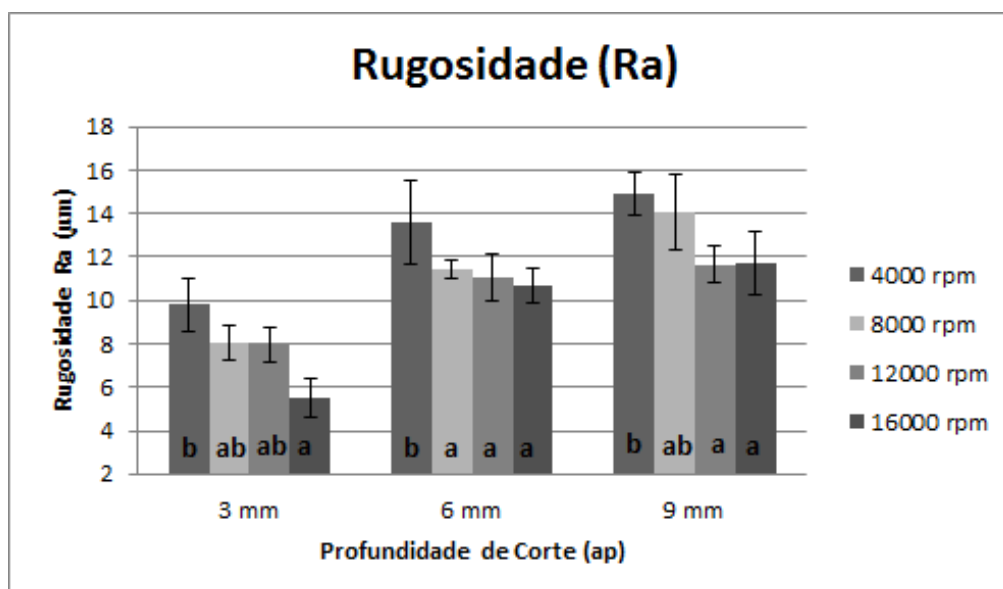
Na sessão discordante houve trepidação na peça durante a usinagem, por isso a maioria dos resultados em alta rotação, ou seja, na maior velocidade de corte demonstraram valores não equivalentes de rugosidade. Lucas Filho (2004) em um estudo sobre o fresamento de jequitibá comenta que alta rotação produz rugosidade superficial até um limite, pois pode ocasionar flexão na ferramenta e conseqüentemente trepidações. Porém a tendência em todas as análises do fresamento é que com o aumento da velocidade de corte a superfície fique menos áspera.

#### 4.2.2.3 Fresamento Frontal

No fresamento frontal realizou-se o teste de Tukey para a velocidade de 2 m/min, os valores médios de Rugosidade (Ra) indicam coeficiente de variação de 21,70%. A profundidade de usinagem apresenta resultado significativo estatisticamente ( $F_{ap} = 28,76$ ; p-value >5%), assim como na velocidade de corte ( $F_{RPM} = 13,31$ ; p-value >5%) e a relação entre a profundidade e velocidade de corte ( $F_{ap \times RPM} = 0,93$ ; p-value >5%). Para o teste de Tukey para a Rugosidade total (Rt) observa-se um coeficiente de variação de 21,85%. Não houve diferenças estatísticas na relação da velocidade de corte e profundidade de usinagem com  $F_{Vc \times ap} = 1,48$ ; p-value >5%. Já na velocidade de corte  $F_{Vc} = 12,08$ ; p-value >5%, assim como na profundidade de usinagem houve diferenças estatísticas significativas ( $F_{Vc} = 18,32$ ; p-value >5%).

Observa-se que na Figuras 74 mostram que os menores valores de rugosidade ocorrem na profundidade 3 mm e velocidade de corte de 804 m/min com Ra 5,5  $\mu\text{m}$  e Rt de 71,66  $\mu\text{m}$ . Os valores de rugosidade têm a tendência de diminuir a medida em que a velocidade de corte aumenta, como nota-se na Figura 75.

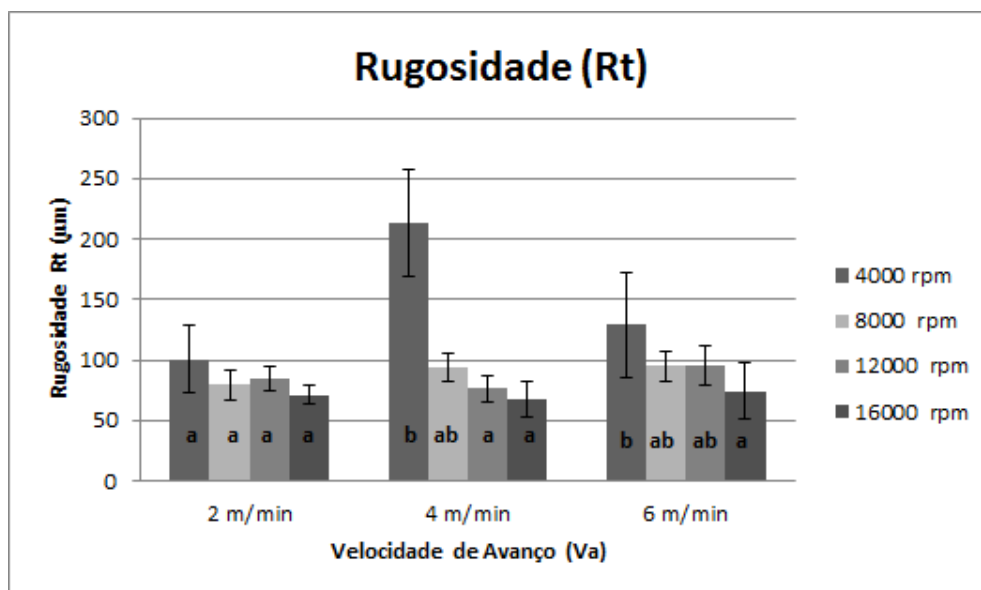
Figura 74 – Rugosidade média Ra das diferentes profundidades de usinagem (ap) para a velocidade de avanço 2 m/min no sentido discordante.



Fonte: (O Autor)



Figura 75 – Rugosidade Total Rt das diferentes profundidades de usinagem ( $a_p$ ) para a velocidade de avanço 2 m/min no sentido discordante.

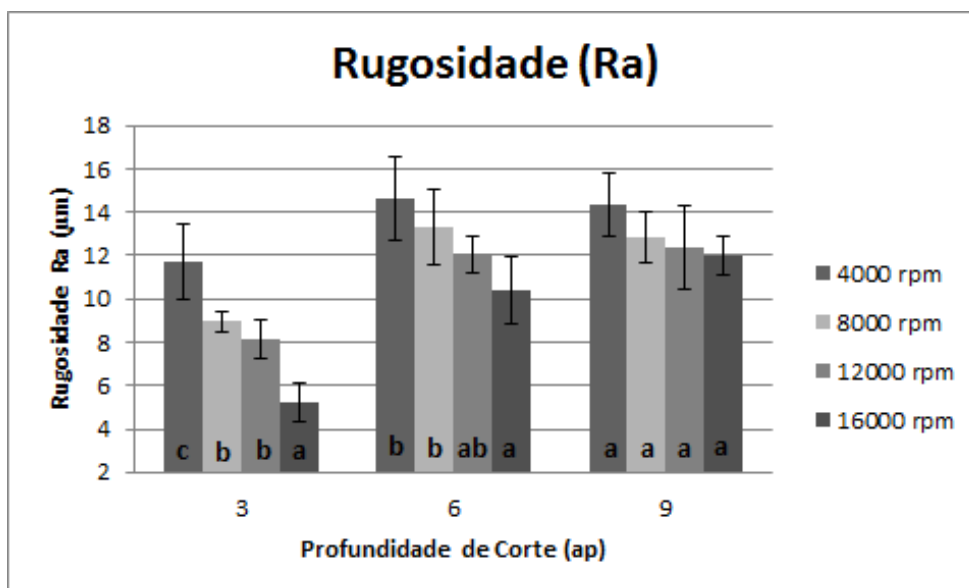


Fonte: (O Autor)

O teste de Tukey para a velocidade de 4 m/min no fresamento frontal para os valores médios de Rugosidade ( $R_a$ ) indicam coeficiente de variação de 11,42%. A profundidade de usinagem ( $F_{ap} = 4,03$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ ) e a profundidade e velocidade de corte ( $F_{ap \times RPM} = 30,64$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ ) apresentam resultado significativo estatisticamente. A relação entre a velocidade de corte e profundidade de usinagem com  $F_{Vc \times ap} = 2,12$ ;  $p\text{-value} > 5\%$  não apresentou resultado significativo. Para o teste de Tukey para a Rugosidade total ( $R_t$ ) observa-se um coeficiente de variação de 18,70%. Não houve diferenças estatísticas na relação da velocidade de corte e profundidade de usinagem com  $F_{Vc \times ap} = 1,43$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ . Já na velocidade de corte  $F_{Vc} = 9,06$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ , assim como na profundidade de usinagem houve diferenças estatísticas significativas ( $F_{Vc} = 11,43$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ ).

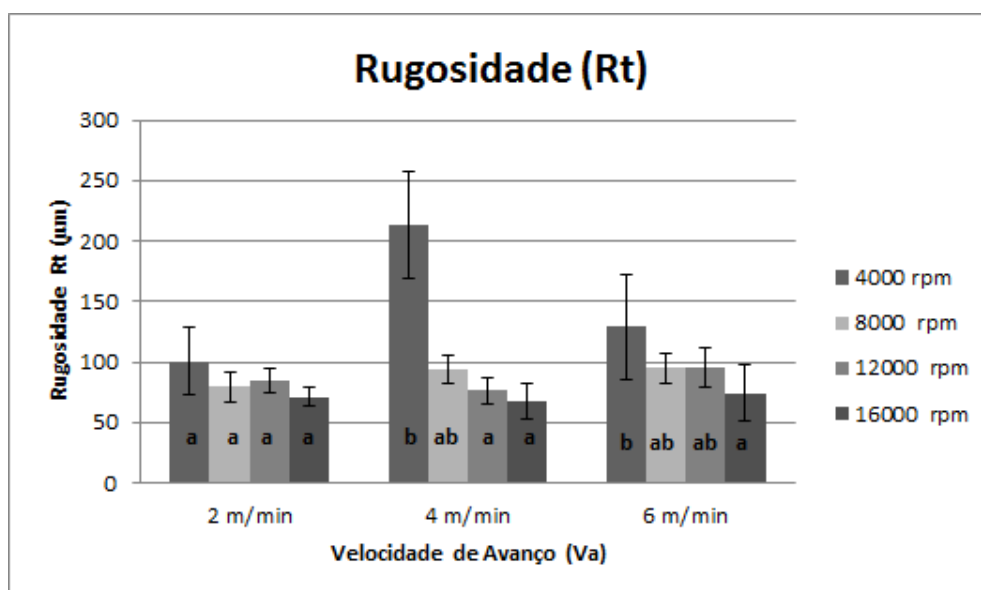
Na Figura 76 observa-se que a profundidade 3 mm possui os menores valores de rugosidade, além de evidenciar que nesta profundidade ocorre uma decrescente relação da rugosidade com a velocidade de corte. Na Figura 77 nota-se que os valores de rugosidade têm a tendência de diminuir a medida que a velocidade de corte aumenta. Os menores valores de rugosidade:  $R_a = 5,26 \mu\text{m}$  e  $R_t = 74,16 \mu\text{m}$  ocorreram na velocidade de corte de 804 m/min (16000 rpm) e profundidade de usinagem 3 mm.

Figura 76 – Rugosidade média Ra das diferentes profundidades de usinagem ( $a_p$ ) para a velocidade de avanço 4 m/min no sentido discordante.



Fonte: (O Autor)

Figura 77 – Rugosidade Total Rt das diferentes profundidades de usinagem ( $a_p$ ) para a velocidade de avanço 4 m/min no sentido discordante.



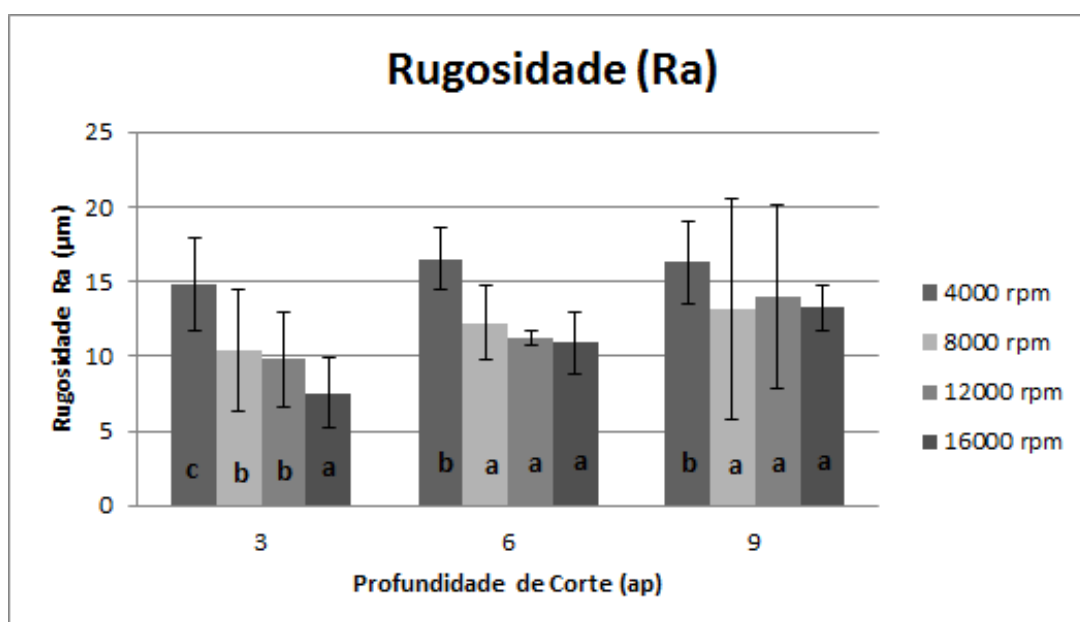
Fonte: (O Autor)

Os valores médios de Rugosidade (Ra) através do teste de Tukey para a velocidade de 6 m/min, indicam coeficiente de variação de 9,84%. Para a velocidade de corte obteve resultado significativo estatisticamente ( $F_{RPM} = 16,24$ ; p-value >5%), assim como na profundidade de usinagem ( $F_{a_p} = 6,36$ ; p-value >5%). Na relação entre a profundidade de usinagem e velocidade de avanço ( $F_{a_p \times RPM} = 12,11$ ; p-value >5%) não ocorre diferenças estatísticas significativas. Para

o teste de Tukey para a Rugosidade total (Rt) observa-se um coeficiente de variação de 24,03%. Não houve diferenças estatísticas na relação da velocidade de corte e profundidade de usinagem com  $F_{V_c \times a_p} = 1,82$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ , assim como na velocidades de corte  $F_{V_c} = 0,36$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ . Já na profundidade de usinagem houve diferença significativa  $F_{a_p} = 9,88$ ;  $p\text{-value} > 5\%$ .

A Figura 78 ilustra que nas quatro velocidades de corte e nas três profundidades de usinagem apresentam uma tendência de diminuir com os maiores valores de velocidade de corte e apresentam diferenças estatísticas significativas. Na profundidade de usinagem de 3 mm apresenta o menor valor de rugosidade na velocidade de corte de 804 m/min (16000 rpm) com Ra igual a 7,5  $\mu\text{m}$  e Rt igual a 93  $\mu\text{m}$ .

Figura 78 - Rugosidade média Ra das diferentes profundidades de usinagem (ap) para a velocidade de avanço 6 m/min no sentido discordante.



Fonte: (O Autor)

#### 4.2.2.4 Discussões sobre a rugosidade em relação a velocidades de corte e profundidade de usinagem.

O menor valor médio da rugosidade (Ra) é encontrado na maior velocidade de corte e menor velocidade de avanço e profundidade de usinagem para o fresamento frontal. Já para o Fresamento tangencial concordante e discordante os menores resultados de rugosidade estão relacionados a profundidade de 1 e 1,5 mm.

Pois quando se aumenta a velocidade de corte e diminui a velocidade de avanço ocorre a redução da força do corte e ocorre a rigidez do amortecimento da ponta da ferramenta de corte, influenciando na aspereza da peça.

Na sessão discordante houve trepidação na peça durante a usinagem, por isso a maioria dos resultados em alta rotação, ou seja, na maior velocidade de corte demonstraram valores não equivalentes de rugosidade. Porém a tendência em todas as análises do fresamento é que com o aumento da velocidade de corte a superfície é menos áspera.

A profundidade de usinagem ( $a_p$ ) é um parâmetro que pouco influencia na rugosidade ( $R_a$ ) cita Rossi et al. (2005) em seu trabalho de fresamento com metais. Porém observa-se nos resultados deste trabalho que para o MDF, nas três velocidades de avanço 2, 4 e 6 m/min a rugosidade apresentou menores valores na menor profundidade de usinagem 3 mm. Nessas condições é possível observar diferenças significativas estatisticamente. Assim como em Castro e Gonçalves (2000) que investigou o fresamento em MDF e concluiu que os menores valores de rugosidade foram em 3 mm de profundidade de usinagem.

Chen et al. (2013) observaram que a maior rotação aliada a maior profundidade resultam em menores rugosidades. Já Ueda et al. (2001) observaram que não há influencia em seu trabalho, da profundidade nos resultados de rugosidade, assim como Dimla (2004). Rossi et al. (2005) observa que a profundidade de 1 mm apresenta os menores resultados de rugosidade.

### **4.2.3 Potência em relação a velocidades de corte, velocidades de avanço e profundidade de usinagem.**

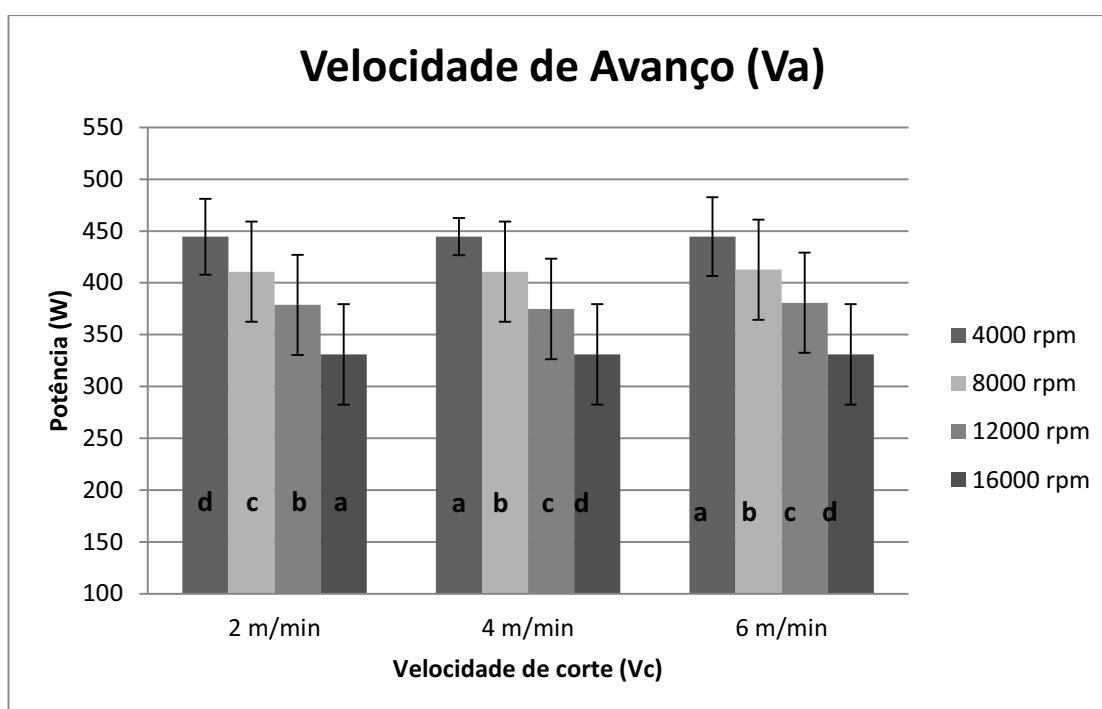
#### **4.2.3.1 Potência no Fresamento Tangencial Concordante em relação a velocidade de avanço.**

Nesta sessão discorre sobre o comportamento da potência em relação as velocidades de corte com interferência da velocidade de avanço. O teste de Tukey da potência para a profundidade de usinagem de 0,5 mm resultou no coeficiente de variação de 0%, pois não há dispersão em termos relativos a seu valor médio. A análise da velocidade de avanço e da velocidade de corte apresentaram diferença estatística significante, bem como a relação entre elas. As letras minúsculas representam diferenças estatísticas entre as velocidades de corte e maiúsculas representam diferenças velocidade de avanço.

Para todas as relações de potência e velocidade de avanço descritas nesta sessão o valor de  $F_{V_a}$ ,  $F_{RPM}$  e  $F_{V_{axRPM}}$  foram iguais a  $1.10^9$  o que corresponde a um resultado significativo em relação as velocidades de avanço, de corte e na relação entre elas.

Na Figura 79 a potência tende a diminuir com o aumento da velocidade de corte, os menores valores de potência ocorrem na velocidade de corte de 804 m/min (16000 rpm). A velocidade de avanço apresenta poucas diferenças estatísticas, na velocidade de 2 m/min não ocorre diferença já na velocidade 4 m/min e 6 m/min as diferenças são mínimas, assim como Barros (2013) que na velocidade de 4 m/min observou menor consumo de potência.

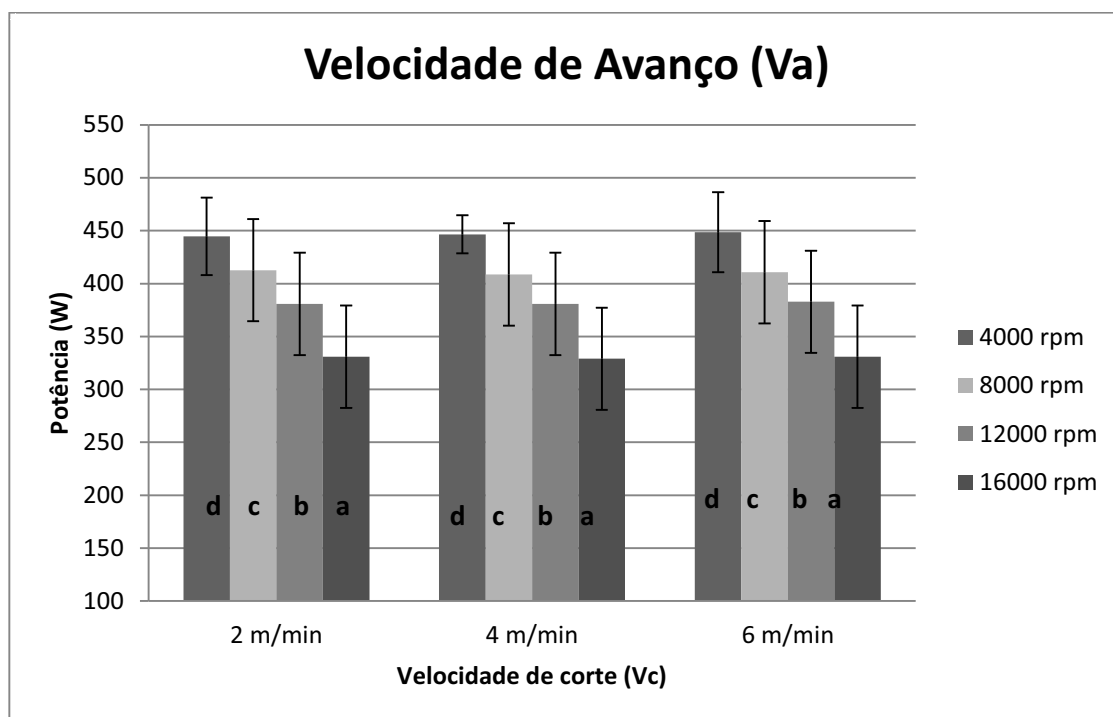
Figura 79 – Potência para a velocidade de avanço na profundidade de usinagem de 0,5 mm.



Fonte: O Autor

Na potência da velocidade de corte na profundidade de 1 mm o Teste de mostra que a potência tende a diminuir com o aumento da velocidade de corte, como observa-se na Figura 80. A velocidade de avanço apresenta diferenças estatísticas significativas, porém com valores muito aproximados. O aumento da velocidade de avanço para 6 m/min corresponde a um leve aumento na potência, com valores superiores a 300 Watts na velocidade de corte de 804 m/min (16000 rpm). Varanda et al. (2010) observou resultados satisfatórios em relação a potência com velocidade de corte de 227 m/min.

Figura 80 – Potência para a velocidade de avanço na profundidade de usinagem de 1 mm.

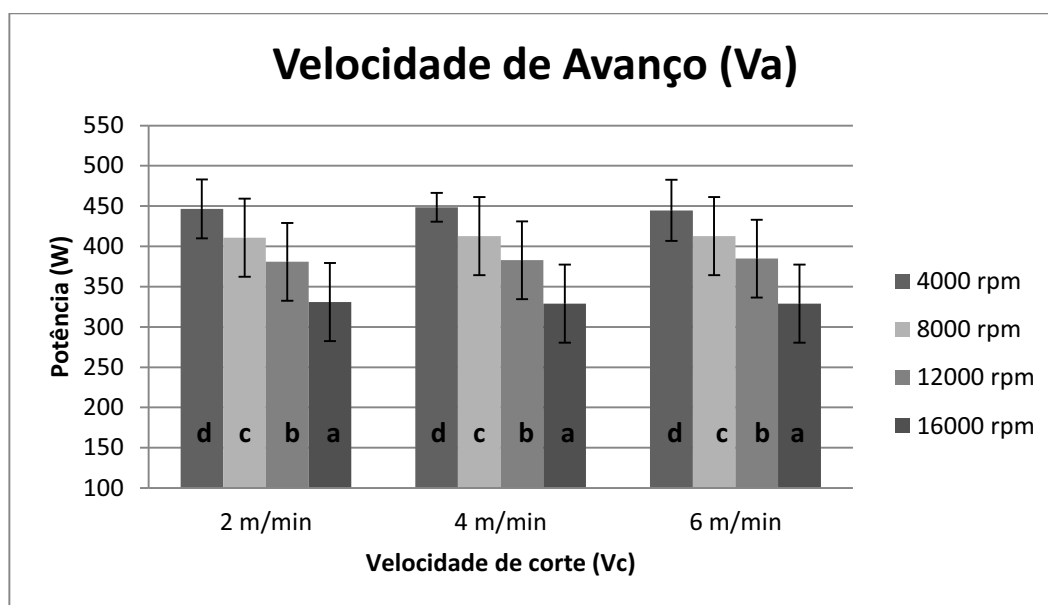


Fonte: O Autor

Os valores encontrados para a profundidade de 1,5 mm demonstram diferenças estatísticas significantes para a velocidade de corte, velocidade de avanço e na relação entre elas, porém os valores de potência em watts são muito aproximados, sendo assim o coeficiente de variação é 0%.

Na Figura 81 a potência tende a diminuir com o aumento da velocidade de corte. A velocidade de avanço apresenta diferenças estatísticas significantes, porém apresenta valores aproximados. Observa-se na velocidade de corte 630 m/min (12000 rpm) que a menor velocidade de avanço 2 m/min apresenta os menores valores de potência.

Figura 81 – Potência para a velocidade de avanço na profundidade de usinagem de 1,5 mm.



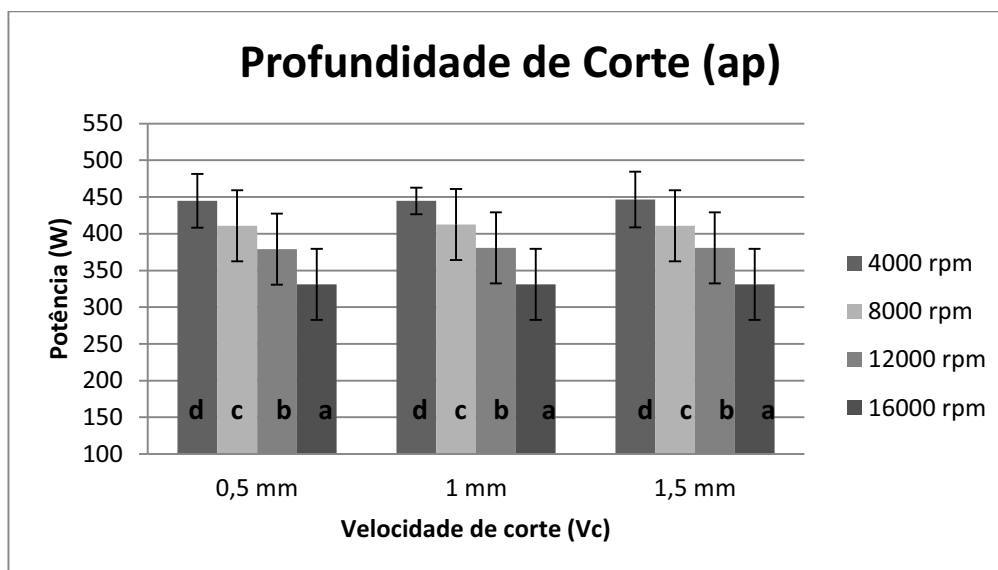
Fonte: O Autor

#### 4.2.3.2 Potência no Fresamento Tangencial Concordante em relação a profundidade de usinagem.

Para todas as relações da potência e profundidade de usinagem descritas nesta sessão o valor de  $F_{Va}$ ,  $F_{RPM}$  e  $F_{VaxRPM}$  foram iguais a  $1.10^9$  o que corresponde a um resultado significativo em relação as velocidades de avanço, de corte e na relação entre elas.

O comportamento da potência em cada profundidade de corte para a velocidade de avanço de 2 m/min. O coeficiente de variação é 0% porém apresenta diferenças significativas para a velocidade de corte, profundidade de corte e relação entre eles. As letras minúsculas representam diferenças estatísticas entre as velocidades de corte e maiúsculas representam diferenças na velocidade de avanço. Observa-se que na Figura 82 que na profundidade de corte 0,5 mm os valores do consumo da potência foram menores, porém muito aproximados das outras profundidades de corte. Ainda é possível observar que a potência diminui nas maiores velocidades de corte 603 e 804 m/min, também é claro que os valores do consumo da potência dentro de cada rotação são equivalentes.

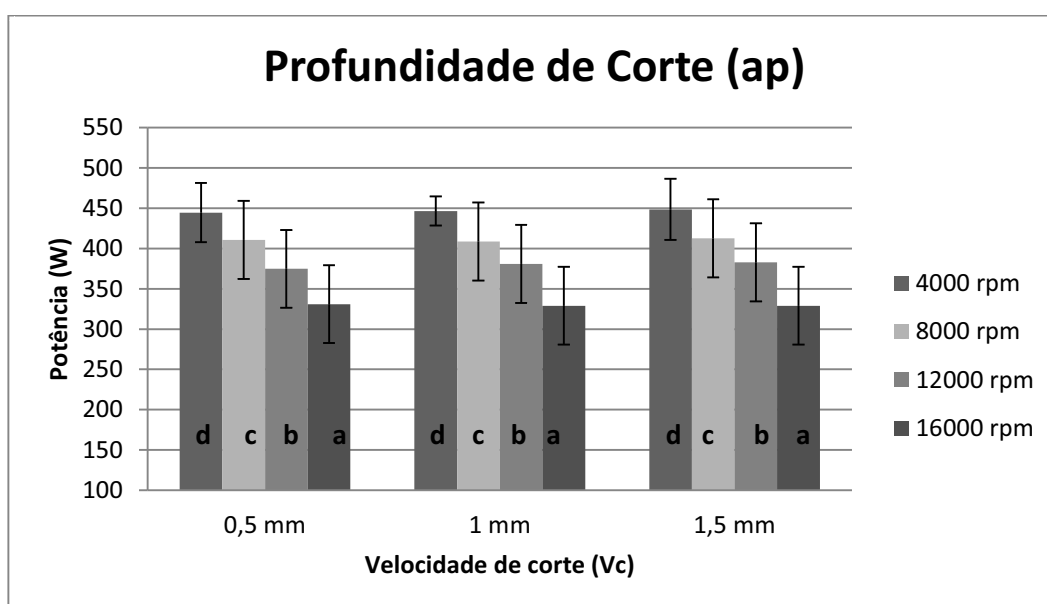
Figura 82 – Potência para a profundidade de usinagem na velocidade de avanço de 2 m/min.



Fonte: O Autor

Para a velocidade de avanço de 4 m/min o comportamento da potência em cada profundidade de usinagem mostra que há diferenças estatísticas significativas para a velocidade de corte, profundidade de usinagem e na relação entre elas, porém os valores de potência em watts são muito aproximados, sendo assim o coeficiente de variação é 0%. Observa-se que os valores são muito aproximados com a tendência de diminuir na maior velocidade de corte 804 m/min.

Figura 83 – Potência para a profundidade de usinagem na velocidade de avanço de 4 m/min.



Fonte: O Autor

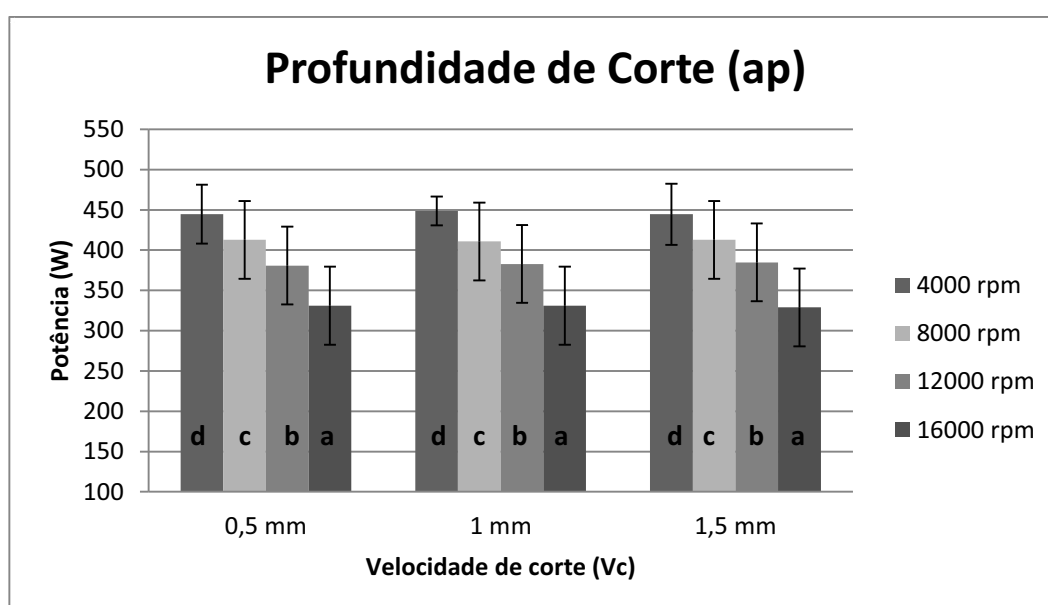


Na Figura 83 observa-se que o consumo da potência diminui com o aumento da velocidade de corte, e é bem menor na velocidade de corte 804 m/min. Os valores de potência para cada rotação são equivalentes, porém na rotação de 12000 rpm observa-se a tendência da potência ser menor na profundidade de usinagem 0,5 mm.

O comportamento da potência em cada profundidade de usinagem para a velocidade de avanço de 4 m/min. Observa-se que os valores do consumo da potência são muito aproximados, no qual o coeficiente de variação é 0%. Ocorre diferenças estatísticas significantes para a velocidade de corte, profundidade de usinagem e na relação entre elas.

Na Figura 84 observa-se que a potência diminui com o aumento da velocidade de corte, os valores de potência para cada rotação são muito aproximados, com uma leve tendência nas rotações de 12000 e 4000 rpm de ser menor na profundidade de usinagem 0,5 mm.

Figura 84 – Potência para a profundidade de usinagem na velocidade de avanço de 6 m/min.



Fonte: O Autor

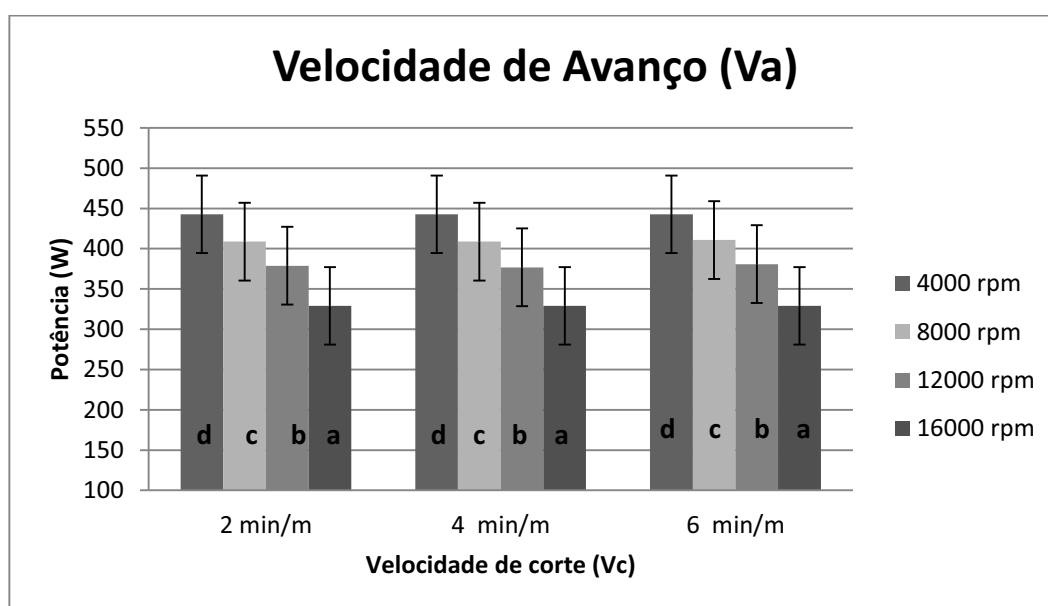
#### 4.2.3.3 Potência no Fresamento Tangencial Discordante em relação a velocidade de avanço a profundidade de usinagem.

Nesta sessão o comportamento da potência em relação as velocidades de corte com interferência da velocidade de avanço. O teste de Tukey da potência para a profundidade de usinagem de 0,5 mm resultou em um coeficiente de variação é de 0%, pois não há dispersão em termos relativos a seu valor médio. As letras minúsculas representam diferenças estatísticas

entre as velocidades de corte e maiúsculas representam diferenças velocidade de avanço. A análise da velocidade de avanço e da velocidade de corte apresentaram diferença estatística significativa com o valor de  $F_{Va}$ ,  $F_{RPM}$  e  $F_{VaxRPM}$  foram iguais a  $1.10^9$ , bem como a relação entre elas.

Na Figura 85 a potência tende a diminuir com o aumento da velocidade de corte. A velocidade de avanço apresenta poucas diferenças estatísticas, na velocidade de 2 m/min não ocorre diferença já na velocidade 4 m/min e 6 m/min as diferenças são mínimas.

Figura 85 – Potência para a velocidade de avanço na profundidade de usinagem de 0,5 mm.

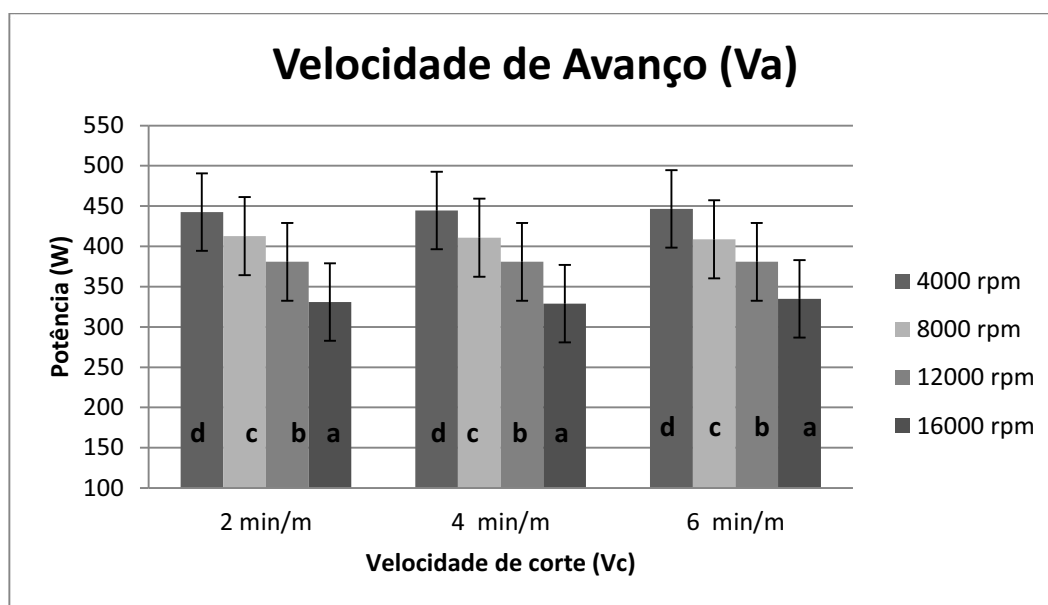


Fonte: O Autor

Observa-se na relação da potência e a profundidade de 1 mm que há diferenças estatísticas significativas, pelo fato do coeficiente de variação ser 0% ocorre pequenas diferenças nos valores. Deste modo, a análise do Tukey demonstra diferenças significativas para a velocidade de corte, velocidade de avanço e a relação entre elas.

Na Figura 86 a potência tende a diminuir com o aumento da velocidade de corte. A velocidade de avanço apresenta diferenças estatísticas, porém com o aumento da velocidade de avanço a diferença diminui. Nas velocidades 4 m/min e 6 m/min há uma tendência dos valores se aproximarem. Na rotação de 4000 rpm há uma leve tendência do consumo de potência ser maior na velocidade de avanço 2 m/min. Barros (2013) que utilizou a velocidade de avanço de 4 m/min para o fresamento de MDF.

Figura 86 – Potência para a velocidade de avanço na profundidade de usinagem de 1 mm.



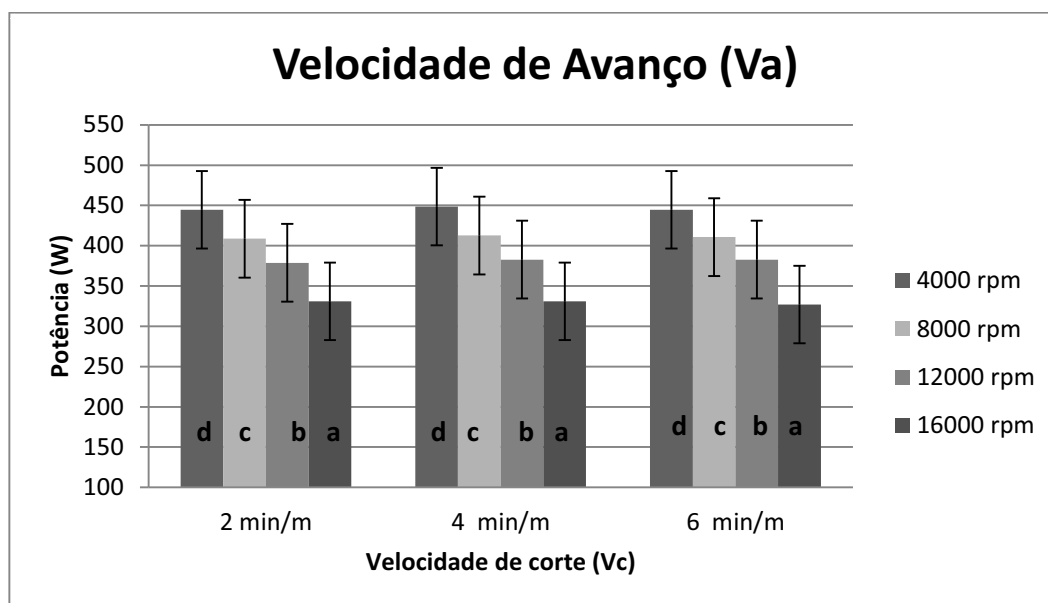
Fonte: O Autor

Os valores encontrados para a potência na profundidade de 1,5 mm demonstram diferenças estatísticas significantes para a velocidade de corte, velocidade de avanço e na relação entre elas, porém são diferenças pequenas. As letras minúsculas representam diferenças estatísticas entre as velocidades de corte e maiúsculas representam diferenças velocidade de avanço.

Na Figura 87 a potência tende a diminuir com o aumento da velocidade de corte. A velocidade de avanço apresenta diferenças estatísticas significativas, porém apresenta valores aproximados e menores com o aumento da velocidade de corte 804 m/min. Na rotação de 4000, 8000 e 12000 rpm há uma leve tendência do consumo de potência ser menor na velocidade de avanço 2 m/min.

A velocidade de avanço exige da ferramenta portanto ao aumentá-la ocorre um excesso de pressão sobre a ferramenta e conseqüentemente aumento do consumo de pressão. Santiago (2011) fez um estudo no lixamento com *pinus elliotti* e observou que utilizando a velocidade de avanço menor o consumo reduz. Assim como em Orłowski et al. (2009) que observou que o aumento na velocidade de avanço provoca diminuição da potência.

Figura 87 – Potência para a velocidade de avanço na profundidade de usinagem de 1,5 mm.



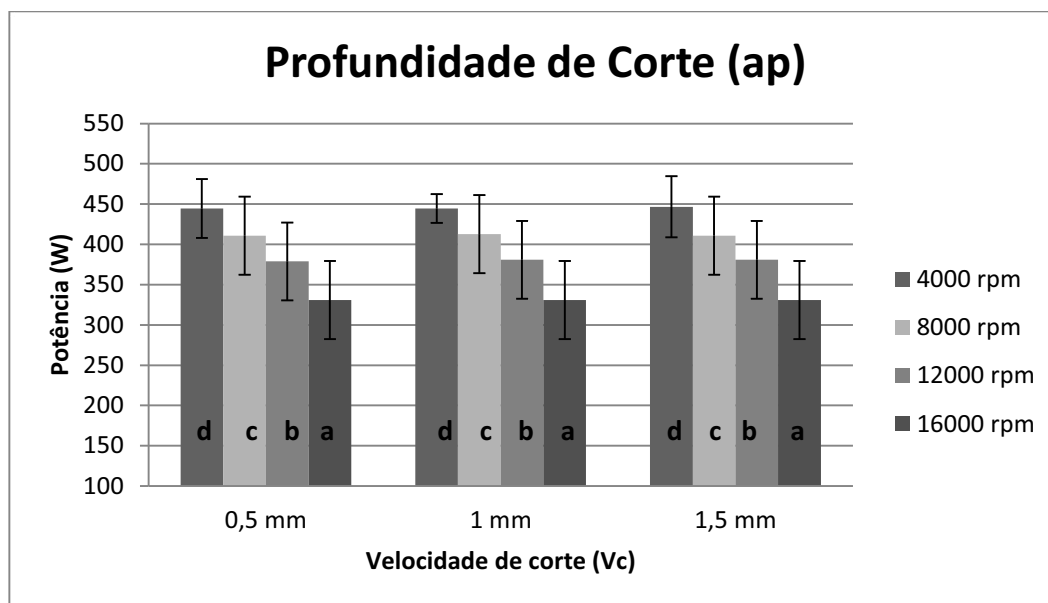
Fonte: O Autor

#### 4.2.3.4 Potência no Fresamento Tangencial Discordante em relação a profundidade de usinagem.

O comportamento da potência em cada profundidade de usinagem para a velocidade de avanço de 2 m/min. O coeficiente de variação é 0%, análise da profundidade de usinagem e da velocidade de corte apresentaram diferença estatística significativa com o valor de  $F_{Va}$ ,  $F_{RPM}$  e  $F_{VaxRPM}$  foram iguais a  $1.10^9$ , bem como a relação entre elas

Na Figura 88 observa-se que a potência diminui com o aumento da velocidade de corte, também é claro que os valores de potência para cada rotação são equivalentes. Assim como em Barros (2013) e Souza et al. (2011) que na usinagem de *Eucalyptus sp* observou que em maiores velocidades de corte apresentaram maiores consumos de potência.

Figura 88 – Potência para a profundidade de usinagem na velocidade de avanço de 2 m/min.

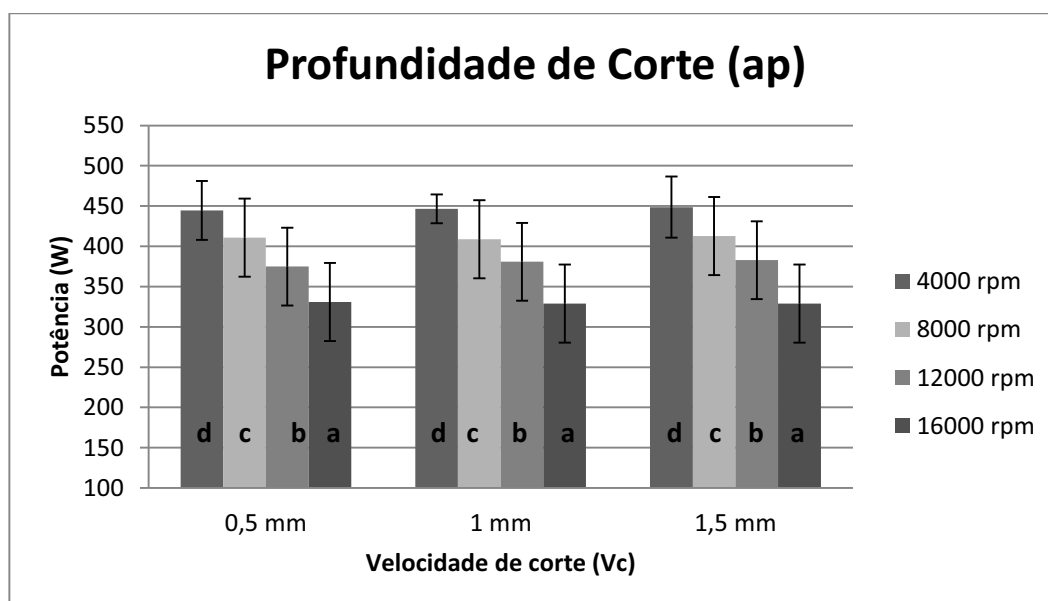


Fonte: O Autor

O comportamento da potência em cada profundidade de usinagem para a velocidade de avanço de 4 m/min. O coeficiente de variação é 0% porém apresenta diferenças significativas para a velocidade de corte, profundidade de usinagem e relação entre eles.

Na Figura 89 observa-se que a potência diminui com o aumento da velocidade de corte, os valores de potência para cada rotação são equivalentes. Observa-se também uma mínima tendência de na profundidade de usinagem 0,5 mm a potência apresentar valores menores.

Figura 89 – Potência para a profundidade de usinagem na velocidade de avanço de 4 m/min.

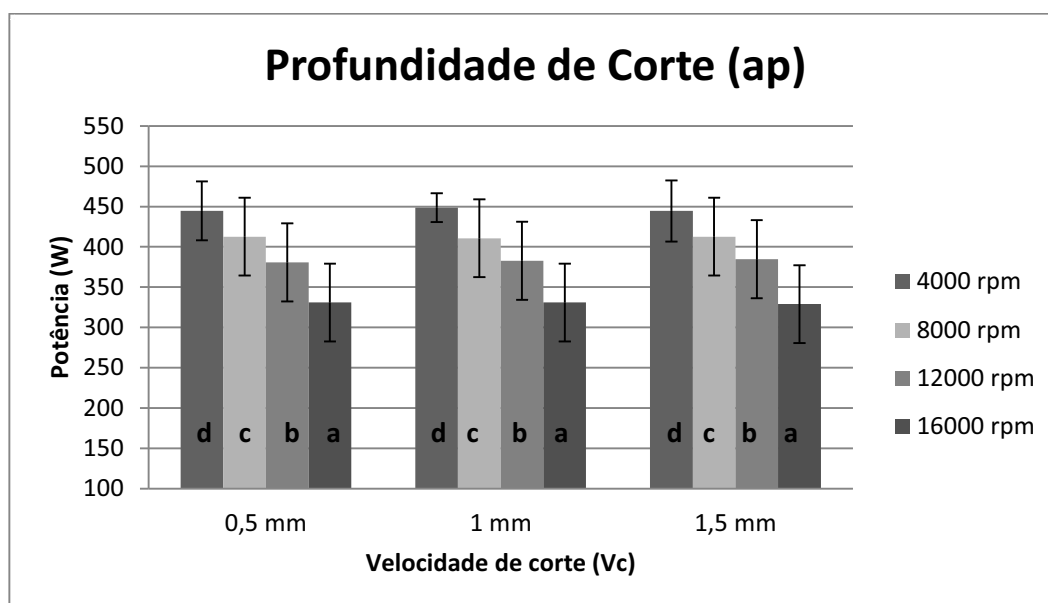


Fonte: O Autor

O comportamento da potência em cada profundidade de usinagem para a velocidade de avanço de 6 m/min. Há diferenças significativas para a velocidade de corte, profundidade de corte e relação entre eles e o coeficiente de variação é 0%.

Na Figura 90 observa-se que a potência diminui com o aumento da velocidade de corte, os valores de potência para cada rotação são equivalentes.

Figura 90 – Potência para a profundidade de usinagem na velocidade de avanço de 6 m/min.



Fonte: O Autor

4.2.3.5 Discussões sobre o consumo de potência no Fresamento Tangencial Concordante e discordante em relação a velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de usinagem.

Observa-se que para todas as profundidades de usinagem: 0,5; 1 e 1,5 mm a potência tem a tendência de diminuir com as maiores velocidades de corte entre 603 e 804 m/min e aumenta com as menores velocidades de avanço 2 e 4 m/min. Isso ocorre pois a alta velocidade de corte provoca a menor retirada de material em menos tempo e com isso a diminuição da potência.

Com a diminuição da velocidade de avanço diminui a velocidade de translação da ferramenta sobre a peça, aumentando o consumo de potência. Assim como em Barros (2013) que investigou consumo da potência através do fresamento de MDF e identificou como menos consumo de potência a velocidade de avanço de 4 m/min e a maior velocidade de corte de 176 m/min. Souza et al. (2011) ao investigar o consumo de potência na usinagem de *Eucalyptus* sp

observou que menores valores de velocidade de avanço implicam em baixos consumos de potência.

O MDF apresentou o mesmo comportamento que a maioria dos materiais em relação ao consumo da potência durante o processo de fresamento concordante tangencial.

Para todas as velocidades de avanço observadas 2, 4 e 6 m/min nota-se o menor consumo da potência nas maiores velocidades de corte. Nas maiores rotações, em um tempo menor, retira-se mais material por dente e deste modo a potência diminui. Nota-se que o consumo de potência, na maioria das vezes apresentou menores valores nas menores profundidades de usinagem. Assim como em Fotin et al. (2008) que investigou a potência no processo de lixamento da madeira de *Birch* sp e identificou que maiores profundidades de usinagem resultam em maiores consumos de potência, além de piorar a rugosidade da superfície. Gontijo (2012) estudou as variáveis durante um processo de usinagem em *Eucalyptus* sp e concluiu que o consumo de potência aumenta com o aumento da velocidade de corte (46 m/s).

Os valores da rugosidade média Ra encontrados no fresamento frontal na profundidade 3 mm com velocidade de corte de 804 m/min e velocidade de avanço de 2 m/min apresentaram média de 7,83  $\mu\text{m}$  valor inferior ao encontrado por Davim et al. (2009) que realizou fresamento frontal em fresadora CNC com velocidade de corte de 904,5 m/min e velocidade de avanço de 2 m/min obtendo Ra de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ .

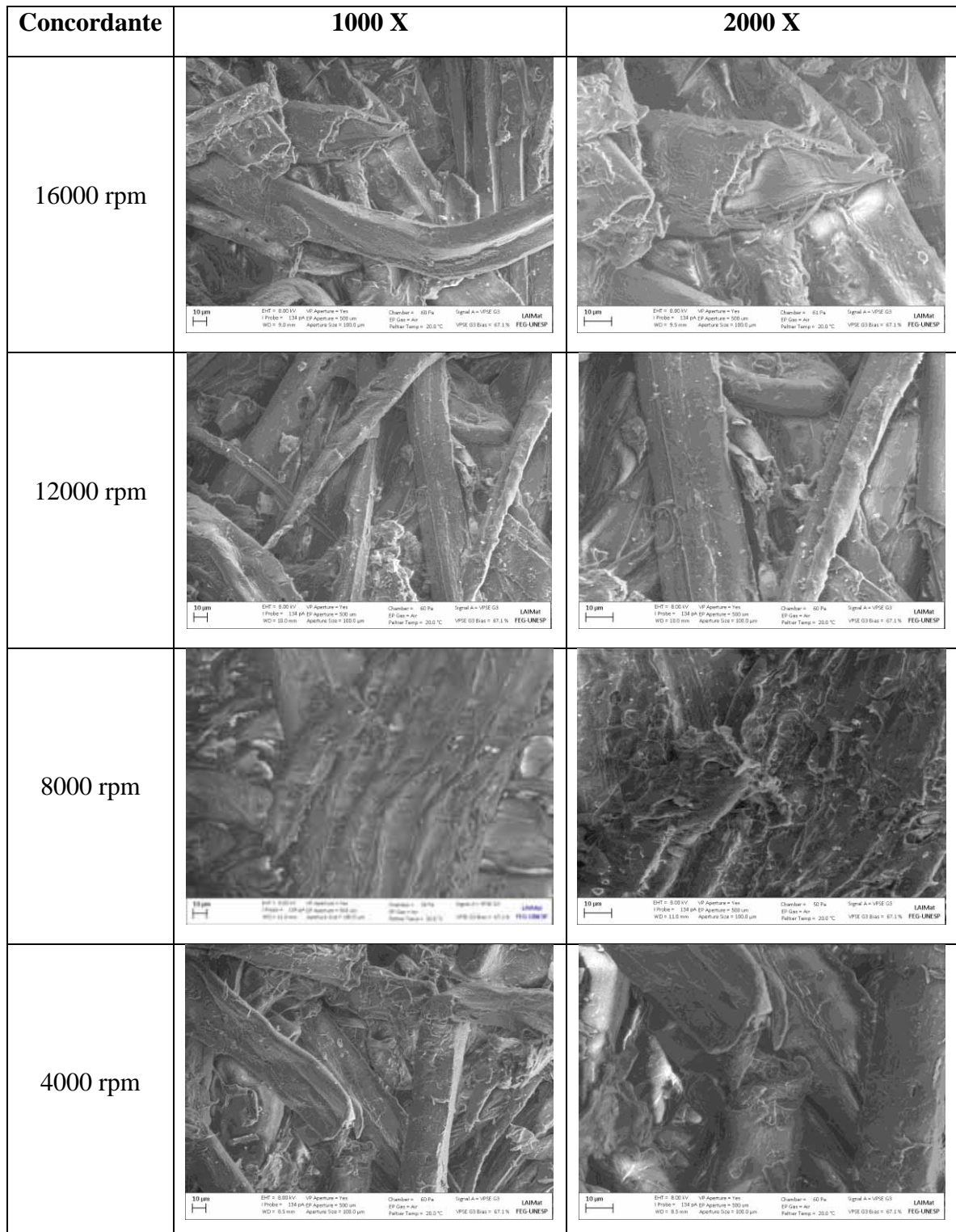
Para o fresamento tangencial a média da rugosidade Ra para velocidade de corte de 402 m/min e profundidade de 1 mm foi de 17  $\mu\text{m}$  valor inferior ao encontrado por Castro e Gonçalves (2002) que realizou um fresamento cilíndrico periférico com fresadora vertical (tupia) na velocidade de corte de 312 m/min e profundidade de 1 mm e obtiveram resultados próximos a 25 e 30  $\mu\text{m}$ . esses resultados salientam o resultado satisfatório para acabamento superficial de MDF no fresamento CNC.

#### 4.3 ANÁLISE DAS IMAGENS DA SUPERFÍCIE DO MDF NO MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV).

##### 4.3.1 Fresamento Tangencial Concordante e Discordante

As imagens dos corpos de prova de MDF do microscópio eletrônico de varredura (MEV) que foram ensaiados no fresamento tangencial concordante na velocidade de avanço de 2 m/min e profundidade de 1,5 mm, encontram-se na Figura 91.

Figura 91 - MEV referente ao ensaio de profundidade 1,5 mm e velocidade 2 m/min no sentido concordante.

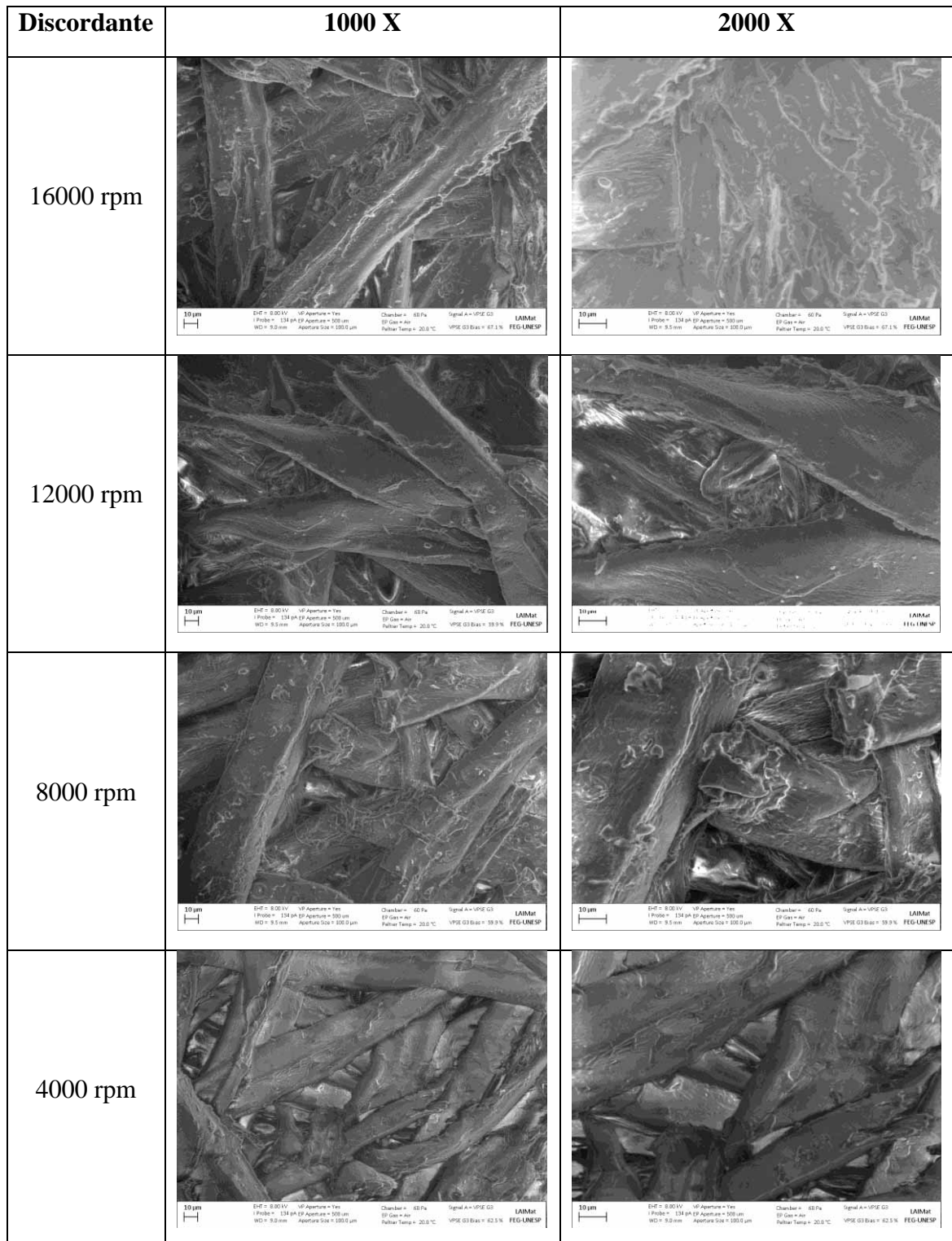


Fonte: O Autor

Observa-se nas imagens do MEV do sentido concordante que nas altas velocidades de corte as fibras foram menos danificadas, apresentando um aspecto de superfície mais homogênea.



Figura 92 - MEV referente ao ensaio de profundidade 1,5 mm e velocidade 2 m/min no sentido discordante.



Fonte: O Autor

Observa-se que na velocidade de corte de 201 m/min (4000 rpm) as fibras estão com aspecto de ásperas, apresentando destacamentos das fibras e ranhuras na superfície.

Compreende-se através da imagem que o rugosímetro percorreu por essas fibras contornando-as uma a uma e por isso aumentou-se a rugosidade.

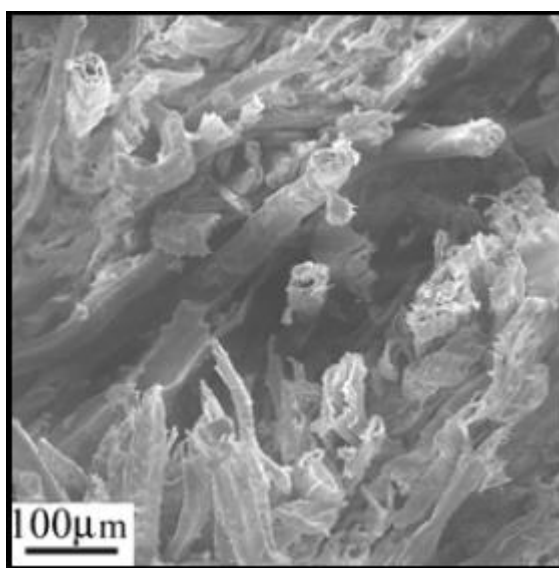
Os corpos de prova de MDF que foram ensaiados no fresamento tangencial discordante na velocidade de avanço de 2 m/min e profundidade de 1,5 mm encontram-se na Figura 92.

No sentido discordante as imagens do MEV também mostram maior quantidade de pontos de fragmentação nas velocidades de corte de 201 e 402 m/min. Nas altas velocidade apresenta-se um aglutinado de fibras que não apresentam aspecto de fragmentadas ou ásperas, demonstram homogeneidade superficial. Destaca-se a velocidade 201 m/min em que as fibras estão intactas, ou seja, uma superfície na qual o rugosímetro detecta mais trepidações.

As observações nas imagens salientam os resultados estatísticos obtidos pela rugosidade Ra e Rt, no qual ocorrem menos defeitos nas maiores velocidades de corte.

Em Castro e Gonçalves (2002) a análise de MEV feita com MDF em processo de fresamento, destacou que ocorre destacamento das fibras para a velocidade de corte 217 m/min e profundidade 1 mm no sentido concordante, como se pode observar na Figura 93.

Figura 93 - Imagem de MEV para MDF no sentido discordante com  $V_c = 217$  m/min e  $a_p = 1$  mm



Fonte: Castro e Gonçalves (2002).

O MDF é um compósito de resina com fibras compactadas e aglutinadas, quando passa pelo fresamento as fibras podem se destacar no sentido concordante, pois neste sentido de corte a ferramenta começa retirar o cavaco com um ângulo máximo até atingir o ângulo zero, deste modo aumenta força da ferramenta ao retirar cavaco, provocando o destacamento de algumas fibras. No sentido discordante a ferramenta inicia o corte com ângulo zero até o ângulo máximo,

deste modo não aplica uma força na peça no início do fresamento, além de não provocar o destacamento das fibras.

Ao comparar o sentido concordante com o discordante as imagens do MEV mostram os resultados equivalentes aos apresentados pelos valores de rugosidade Ra e Rt. O sentido discordante apresenta menos danificações nas fibras, com fibras inteiras sem o aspecto de fragmentadas.

### **4.3.2 Fresamento Frontal**

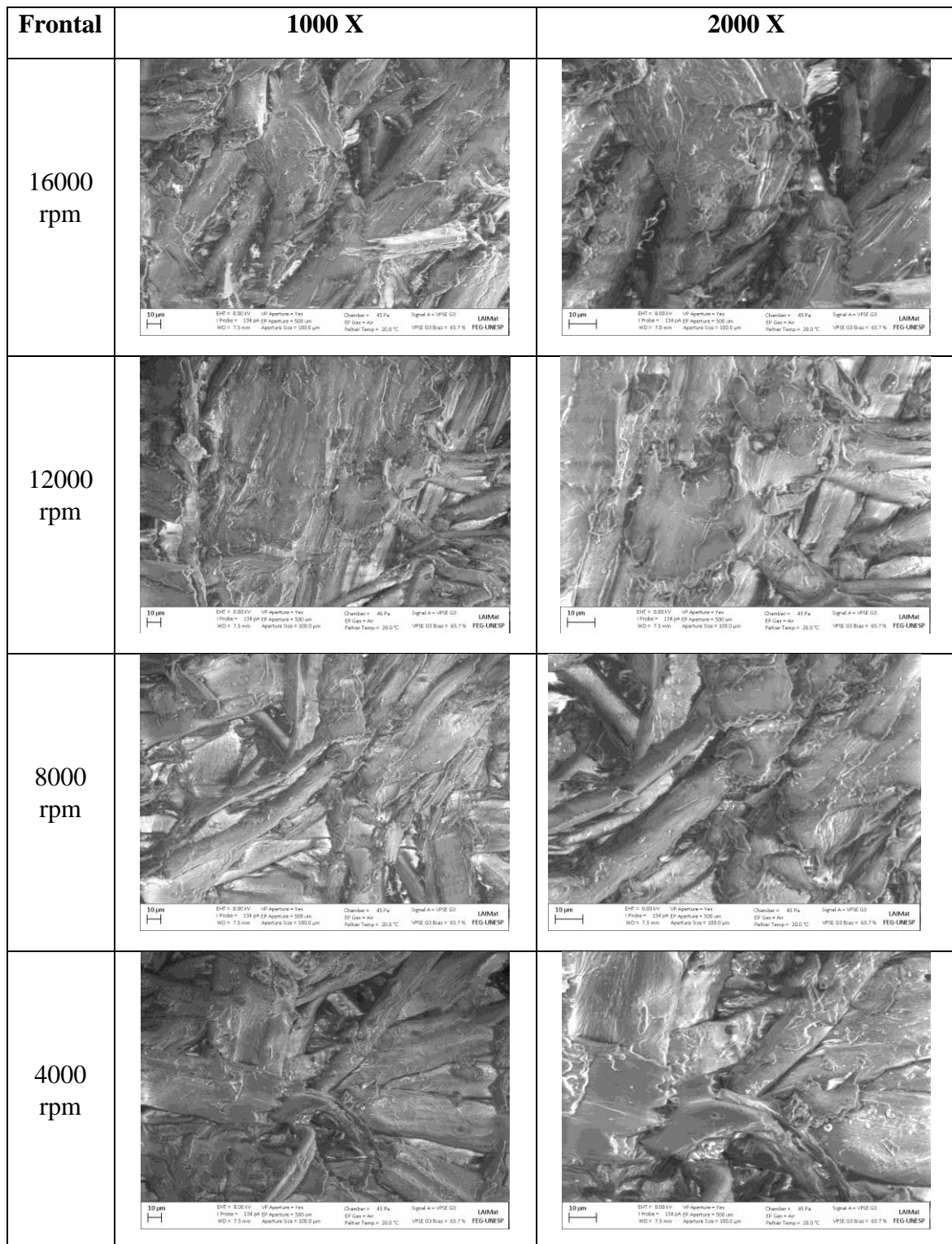
No Fresamento frontal os corpos de prova de MDF escolhidos para análise das imagens do MEV foram do ensaio com velocidade de avanço de 4 m/min e com três diferentes profundidades de usinagem: 3, 6 e 9 mm. Na Figura 85 apresentam-se as imagens referente a profundidade de 3 mm.

Na Figura 94 observa-se na velocidade 804 e 603 m/min fibras entrecruzadas e aglutinadas com textura mais homogênea. Já nas velocidades 402 e 201 m/min apresenta mais fibras fragmentadas, porém há uma textura próxima ao homogêneo.

Na Figura 95 estão apresentadas as imagens de MEV para a profundidade de usinagem de 6 mm e com a mesma velocidade de avanço 4 m/min.

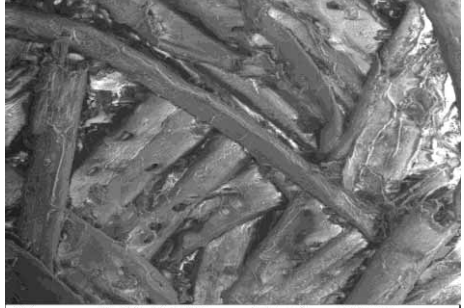
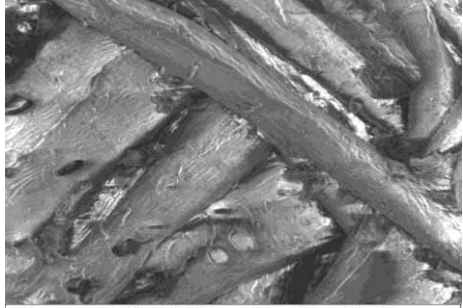

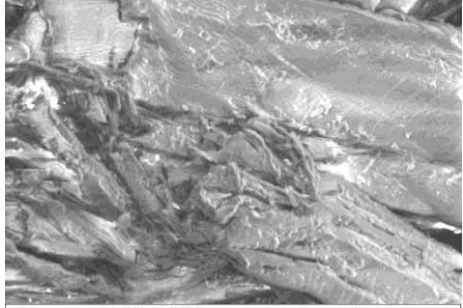
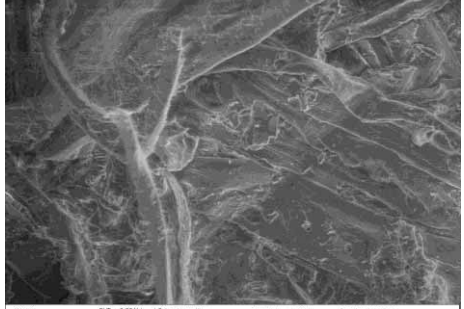
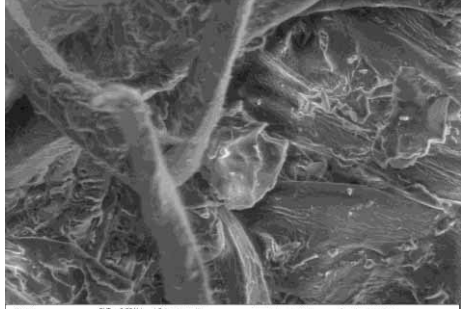
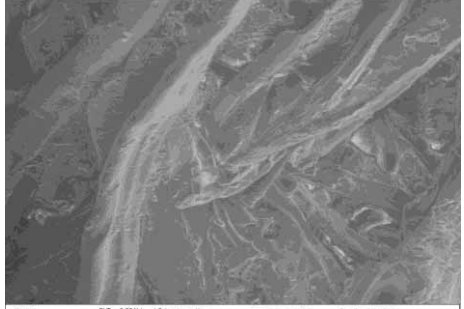
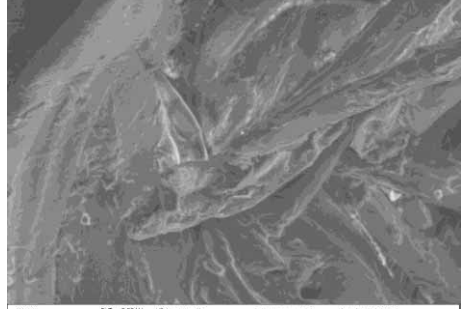
Na profundidade de 6 mm observa-se que diminui as deformações nas fibras nas velocidades de corte de 603 e 804 m/min. Na velocidade de 603 m/min apresenta um aspecto de superfície mais homogênea, sem muitas ranhuras e fragmentações. Nas velocidades de 201 e 402 m/min aumento de fibras fraturadas. A Figura 87 observa-se as imagens de MEV para a as quatro velocidades de corte, três velocidades de avanço e profundidade de 9 mm.

Figura 94 - MEV referente ao ensaio de profundidade 3 mm e velocidade 4 m/min no fresamento Frontal.



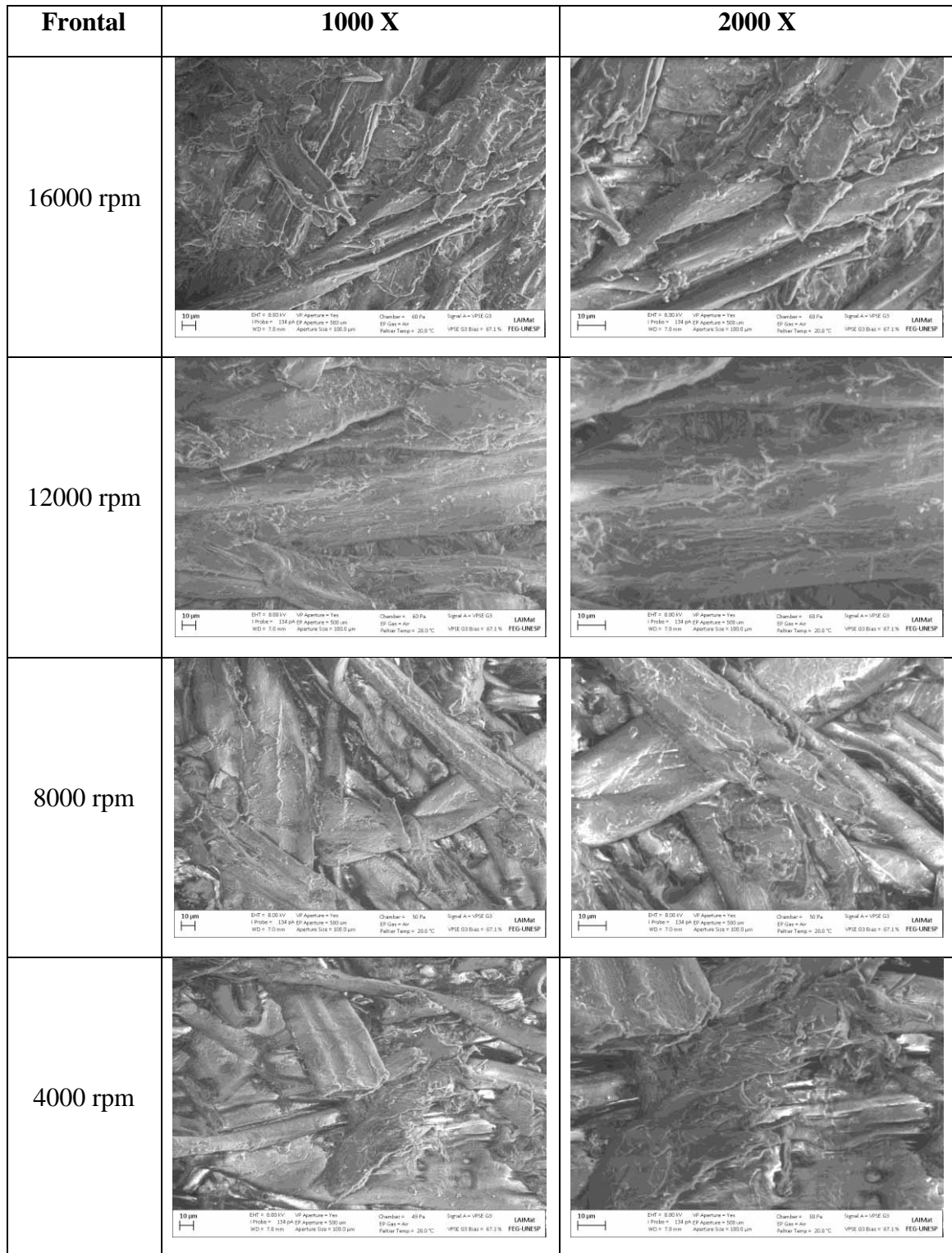
Fonte: O Autor

Figura 95 - MEV referente ao ensaio de profundidade 6 mm e velocidade 4 m/min no fresamento Frontal.

Frontal	1000 X	2000 X
16000 rpm	 <p>10 µm EHT = 8.00 kV VP Aperture = Yes Chamber = 49 Pa Signal A = VISE G3 LAIMat          I Probe = 134 pA IP Aperture = 500 µm EF Gas = Air VISE G3 Bias = 67.1% FEG-UNESP          WD = 83.3 mm Aperture Size = 300.0 µm Pulseur Temp = 20.0 °C</p>	 <p>10 µm EHT = 8.00 kV VP Aperture = Yes Chamber = 50 Pa Signal A = VISE G3 LAIMat          I Probe = 134 pA IP Aperture = 500 µm EF Gas = Air VISE G3 Bias = 67.1% FEG-UNESP          WD = 83.3 mm Aperture Size = 300.0 µm Pulseur Temp = 20.0 °C</p>
12000 rpm	 <p>10 µm EHT = 8.00 kV VP Aperture = Yes Chamber = 50 Pa Signal A = VISE G3 LAIMat          I Probe = 134 pA IP Aperture = 500 µm EF Gas = Air VISE G3 Bias = 67.1% FEG-UNESP          WD = 83.3 mm Aperture Size = 300.0 µm Pulseur Temp = 20.0 °C</p>	 <p>10 µm EHT = 8.00 kV VP Aperture = Yes Chamber = 50 Pa Signal A = VISE G3 LAIMat          I Probe = 134 pA IP Aperture = 500 µm EF Gas = Air VISE G3 Bias = 67.1% FEG-UNESP          WD = 83.3 mm Aperture Size = 300.0 µm Pulseur Temp = 20.0 °C</p>
8000 rpm	 <p>10 µm EHT = 8.00 kV VP Aperture = Yes Chamber = 50 Pa Signal A = VISE G3 LAIMat          I Probe = 134 pA IP Aperture = 500 µm EF Gas = Air VISE G3 Bias = 67.1% FEG-UNESP          WD = 83.3 mm Aperture Size = 300.0 µm Pulseur Temp = 20.0 °C</p>	 <p>10 µm EHT = 8.00 kV VP Aperture = Yes Chamber = 50 Pa Signal A = VISE G3 LAIMat          I Probe = 134 pA IP Aperture = 500 µm EF Gas = Air VISE G3 Bias = 67.1% FEG-UNESP          WD = 83.3 mm Aperture Size = 300.0 µm Pulseur Temp = 20.0 °C</p>
4000 rpm	 <p>10 µm EHT = 8.00 kV VP Aperture = Yes Chamber = 49 Pa Signal A = VISE G3 LAIMat          I Probe = 134 pA IP Aperture = 500 µm EF Gas = Air VISE G3 Bias = 67.1% FEG-UNESP          WD = 83.3 mm Aperture Size = 300.0 µm Pulseur Temp = 20.0 °C</p>	 <p>10 µm EHT = 8.00 kV VP Aperture = Yes Chamber = 49 Pa Signal A = VISE G3 LAIMat          I Probe = 134 pA IP Aperture = 500 µm EF Gas = Air VISE G3 Bias = 67.1% FEG-UNESP          WD = 83.3 mm Aperture Size = 300.0 µm Pulseur Temp = 20.0 °C</p>

Fonte: O Autor

Figura 96 - MEV referente ao ensaio de profundidade 9 mm e velocidade 4 m/min no fresamento Frontal.

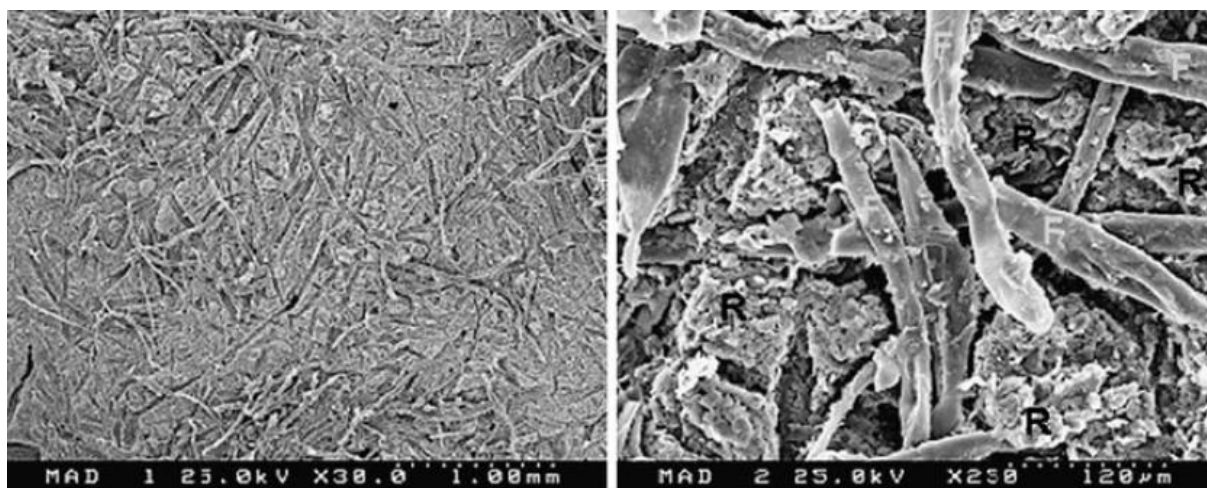


Fonte: O Autor

Na Figura 96 observa-se fibras compactadas e com textura mais homogênea nas maiores velocidades de corte. Já nas menores velocidades de corte as fibras apresentam-se danificadas e fragmentadas.

Davim et al. (2009) analisou imagem de MEV no fresamento frontal do MDF com velocidade de corte de 1608 m/min, velocidade de avanço de 10 m/min e profundidade de 5 mm. Observa-se na Figura 97 que as fibras foram pouco danificadas nestas condições, assim como os resultados deste trabalho velocidades altas com profundidade de 3 mm as fibras se danificam menos.

Figura 97 - Análise de MEV do MDF no fresamento frontal para  $V_c = 1608$  m/min,  $V_a = 10$  m/min e  $a_p = 5$  mm.



Fonte: Davim et al. (2009)

Ao comparar a profundidade 3 mm (Figura 94), 6 mm (Figura 95) e 9 mm (Figura 96) nota-se a profundidade 9 mm apresenta mais regiões de fibras fraturadas, com aspecto de ásperas. Na profundidade 3 mm imagem demonstra que as diferenças na velocidade de corte apresentam diferenças mínimas. As análises das imagens de MEV são compatíveis com os resultados da estatística da Rugosidade  $R_a$  e  $R_t$ .

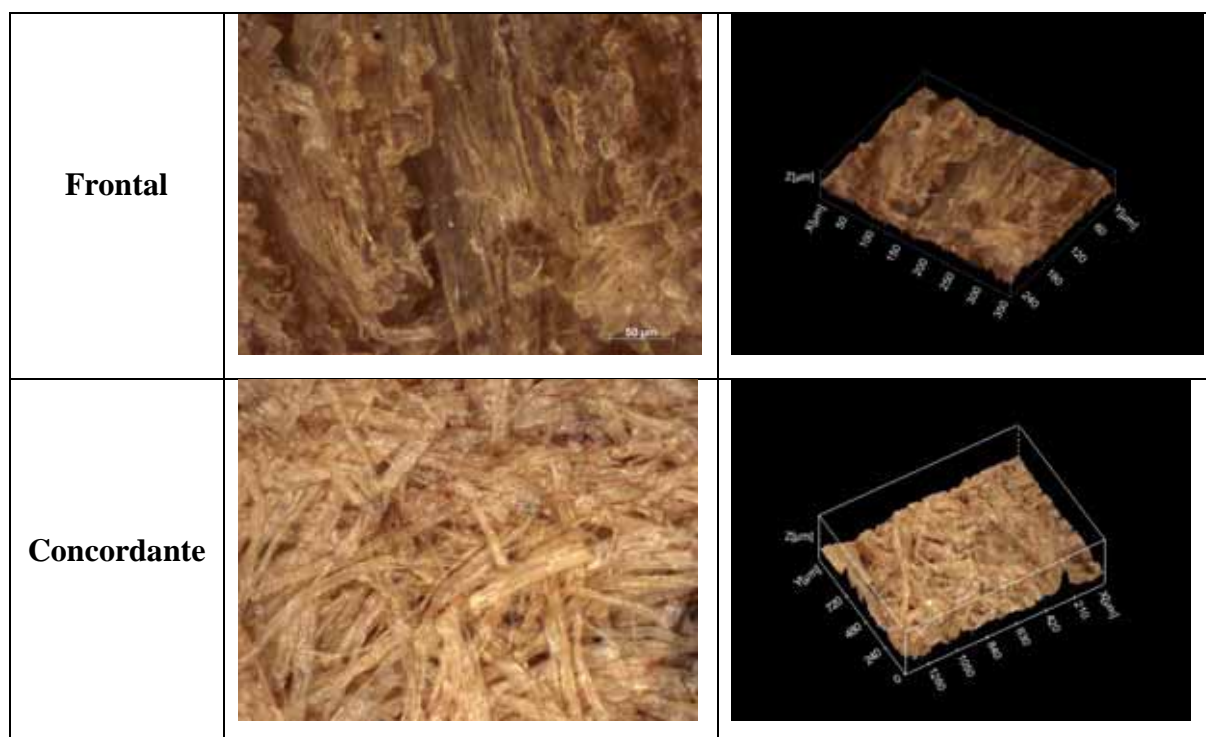
#### 4.4 ANÁLISES DAS IMAGENS DE TOPOGRAFIA DA SUPERFÍCIE.

A análise de topografia da superfície foi realizada para o fresamento tangencial concordante na velocidade de corte de 12000 rpm, velocidade de avanço de 2 m/min e profundidade de usinagem de 1,5 mm e para o fresamento frontal na velocidade de corte de 12000 rpm, velocidade de avanço de 4 m/min e profundidade 4 mm. Na Figura 98 observa-se diferenças nas fibras entre os dois tipos de fresamento, no qual o fresamento frontal fragmentou



mais as fibras, apresentando maior número de lascas, fibras partidas e danificadas. Porém os resultados de rugosidade Ra apresentam valores em média 50% mais baixos que no fresamento concordante e discordante. Deste modo, há de se pensar que no fresamento frontal ocorre maior destruição das fibras no aglutinado fibroso do MDF sem deixar que isso interfira no acabamento da superfície. Com as fibras inteiras, o rugosímetro teria de contornar uma a uma elevando assim o valor da rugosidade.

Figura 98 - Topografia do fresamento frontal e concordante.



Fonte: O Autor



## 5. CONCLUSÕES

Conclui-se 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 apresenta influencia nestes ensaios foi o sentido discordante, que corresponde aos menores valores de rugosidade. Este fato pode ser observado também nas analise de superfícies do MEV. O fresamento frontal apresenta os menores valores de rugosidade em relação a todos os fresamento realizados, principalmente na profundidade de 3 mm, como mostra as imagens de topografia.

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.

Os resultados dos parâmetros que resultam na qualidade superficial adequada para o MDF discutidos neste trabalho, podem colaborar com a comunidade industrial, pois sabe-se que a tecnologia está presente nas empresas, nas quais todo o método é empírico. Através da contribuição deste estudo será possível iniciar um processo de fresamento com CNC em MDF com possibilidade de maior produtividade e qualidade.

Para trabalhos futuros, a investigação da relação dos parâmetros de velocidade de corte, avanço e profundidade ainda podem ser melhorados para o MDF. Também é necessário o estudo aprofundado e detalhado das imagens de MEV e Topografia para este tipo de material, pois não é uma pratica comum.

## 6. REFERENCIAS

1. AGUILERA, A.; MUÑOZ, H. Rugosidad superficial y potencia de corte en el cepillado de acacia melanoxylon y sequoia sempervirens. **Maderas. Ciencia Y Tecnología**, Concepción, v. 13, n. 1, p.19-28, 2011.
2. ALMEIDA, A. L. M. **Estudo do fresamento de madeiras em centro de usinagem CNC**. 2013. 103 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Madeireira, Universidade Estadual Paulista, Campus Experimental de Itapeva, Itapeva, 2013.
3. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 1666-11: standard test methods for conducting machining tests of wood and wood-base panel materials**. Philaladelphia. p.226 - 245, 2011
4. 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, Rio Grande do Sul. 2002.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE (ABIMCI). **Estudo setorial 2009**. Curitiba: 2009, 43p.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA - ABIPA. **Nossas unidades industriais**. Disponível em: <http://www.abipa.org.br/produtosMDF.php>. Acesso em: 17 de julho de 2014.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA - ABIPA. **MDF - Medium Density FiberBoard - Painéis de Fibra de Média Densidade**. Disponível em: <http://www.abipa.org.br>. Acesso em: 09 mar. 2014.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT - (NBR 15316-3) - Chapas de fibras de média densidade – Parte 3 – Métodos de ensaio**. 2009.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT (NBR ISO 513): Classificação e aplicação de metais duros para usinagem com arestas de corte definidas – designação dos grupos principais e grupos de aplicação**. Rio de Janeiro: 2013, 4p.
10. 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.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6162 (1988) – Conceito da Técnica de Usinagem, Movimentos e Relações Geométricas – Terminologia**. São Paulo. 1988.
12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6405: rugosidade das superfícies**. Rio de Janeiro, 1988.

13. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8404**. Rio de Janeiro, 1984.
14. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4288: especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**. Rio de Janeiro, Nov. 2008.
15. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário Estatístico ABRAF 2013: ano base 2012**. Brasília: 2013, 148p.
16. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT (NBR 15316-1) - Chapas de fibras de média densidade. Parte 1: Terminologia**. Rio de Janeiro, 2006.
17. AYRILMIS, N., BENTHIEN, J.T., THOEMEN, H. Effects of formulation variables on surface properties of wood plastic composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 2 p. 325-331, 2012
18. BALACHANDRAN, B. E ZHAO, M. X (2000). A Mechanics Based Model For Study Of Dynamics Of Milling Operations. **Meccanica** 35: 89–109. 2000.
19. BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO - BNDES. **Painéis de Madeira no Brasil - Panorama e Perspectivas**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 27, p. 121-156, mar. 2008
20. BARROS, V.R. **Fresamento de madeiras de média densidade- MDF**. 2013. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Madeireira, Universidade Estadual Paulista, Campus Experimental de Itapeva, Itapeva, 2013.
21. BELINI, U.L. **Caracterização e alterações na estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus grandis* em três condições de desfibramento e efeito nas propriedades tecnológicas de painéis MDF**. 2007. 90 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos Florestais) – ESALQ/USP, Piracicaba. 2007.
22. BRAGA, P.P.C. SILVA, J.R.M. NERI, A.C. CALEGÁRIO, N. LIMA, J.T. Qualidade da superfície de madeira de *Coffea arabica*. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 21-28 jan./mar. 2014
23. CAMPOS, C.L. LAHR, F.A.R. Estudo Comparativo dos Resultados de Ensaio de Tração Perpendicular para MDF Produzido em Laboratório com Fibras de Pinus e de Eucalipto Utilizando Uréia-Formaldeído. **Matéria**. vol 9, Nº 1. 2004
24. CARDOSO, F. G. **Análise de forças de fresamento de roscas API**. 2012, 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais). Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ. Rio de Janeiro – RJ. 2012.

25. CASTRO, E. M.; GONÇALVES, M. T. T. O processo produtivo do MDF (medium density fiberboard). In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CD-ROM), 13., Curitiba, 1998.
26. CASTRO, E. M.; GONÇALVES, M. T. T. Estudo do acabamento superficial em chapas MDF usinadas em processo de fresamento. **MADEIRA: arquitetura e engenharia**, ano 3, n.8, 2002.
27. CHEN, CHIH-CHERN; LIU, NUN-MING; CHIANG, KO-TA; CHEN, HUA-LUN. 2012 Experimental Investigation Of Tool Vibration And Surface Roughness In The Precision End-Milling Process Using The Singular Spectrum Analysis. **Int J Adv Manuf Technol**. 63:797–815. 2012.
28. COSTA, E. S. “**Disciplina: Processo de Usinagem**”.Divinópolis, MG. 2006. 6 p.
29. DAVIM, J. P. CLEMENTE, V.C. SILVA, S. Surface Roughness Aspects In Milling MDF (Medium Density Fibreboard). **Int J Adv Manuf Technol** 40:49–55. 2009.
30. DE CONTI, A. C. **Resistência mecânica de juntas coladas em madeira de *Eucalyptus sp.*** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.
31. DIMLA, D.E. The Impact Of Cutting Conditions On Cutting Forces And Vibration Signals In Turning With Plane Face Geometry Inserts. **Journal of Materials Processing Technology** 155–156. 1708–1715. 2004.
32. DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. “**Tecnologia da Usinagem dos Materiais**”. 8. ed. São Paulo: Art Liber, 2013. 272 p.
33. ESPANHOL, Victor. **Manual Didático CNC**. Porto Alegre: Sagra, 1989.
34. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **European Standard EN 310- Particleboards and Fiberboards – Determination of modulus of elasticity in bending and bending strength**. Bruxelas, 1993.
35. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **European Standard EN 317-Particleboards and Fiberboards – Determination of swelling in thickness after immersion in water**. Bruxelas, 1993.
36. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **European Standard EN 319 – Particleboards and Fiberboards – determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board**. Bruxelas, 1993.
37. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **European Standard EN 622 – Tableros de fibras – Especificaciones. Parte 5 : Requisitos de los tableros de fibras fabricados por proceso seco** . Bruxelas, 2006.

38. 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.
39. 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.
40. FERNANDES, J.A. CASANOVA, C.A.M., TEIXEIRA, C.R. E BALZARETTI, N.M. Ferramentas diamantadas para usinagem de madeira. **Estudos Tecnológicos** - Vol. 7, nº 1: 55-70 -jan/abr -2011.
41. FERRARESI, D. **Fundamento Da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 751p.
42. FERREIRA. E.S. **Propriedades físico-mecânicas de painéis de fibras de média densidade (MDF) produzidos com resinas convencionais e modificadas com tanino de acácia Negra**. 2010. 212f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná. Curitiba-PR. 2010.
43. LUCAS FILHO, F. C.. **Análise da usinagem da madeira visando a melhoria de processos em indústrias de móveis**. 2004. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) -Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC. Florianópolis –SC.2004.
44. 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.
45. FONTIN, A.; CISMARU, I.; SALCA, E. A. Experimental research concerning the Power consumption during the sanding process of birch wood. **ProLigno**, v.4, n. 3, p.37-45, sep. 2008.
46. FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. Adhesives with Wood Materials- Bond Formation and Performance. Forest Products Laboratory. 2010. **Wood handbook – Wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agricultura, Forest Service, Forest Products Laboratory, 508p. 2010.
47. GOLI G., BLERON L., MARCHAL R., UZIELLI L., NEGRI M. 2002. - **Surfaces formation and quality in moulding wood at various grain angles. Initial results with Douglas fir and Oak**, Proceedings of the IUFRO Symposium: Wood Structure and Properties 2002 – Zvolen(SK) September 1-3rd 2002.
48. GOLI, G; FIORAVANTI, M; MARCHAL, R; UZIELLI, L; BUSONI, S. Up-Milling And Down-Milling Wood With Different Grain Orientations – The Cutting Forces Behaviour. **Eur. J. Wood Prod.** 68:385–395. 2010.

49. GONÇALVES, F.G., LELIS, R. C.; OLIVEIRA, J. T.S. Influência da composição da resina tanino-ureia-formaldeído nas propriedades físicas e mecânicas de chapas aglomeradas. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.32, n.4, p.715-722, 2008.
50. 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.
51. GONÇALVES, R.; NÉRI, A. C., Orthogonal cutting forces in juvenile and *mature pinus taeda* wood. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 4, p.310-318, ago. 2005.
52. GONTIJO, T. G. 2012. 61 p. **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.
53. HALVARSSON, S.; EDLUND, H., NORGREN, M. Properties of medium-density fiberboard (MDF) based on wheat straw and melanmine modified urea formaldehyde (UMF) resin. **Industrial Crops And Products**. V.28, p.37-46, 2008.
54. INTERNATIONAL STANDARD. 1997. ISO 4287. **Geometrical product specifications (GPS) – surface texture: profile method – terms, definitions and surface texture parameters**. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland. 1997.
55. IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. FUPEF. Curitiba, 2005.
56. 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.
57. KILIC, M., HIZIROGLU, S., BURDURLU. Effect of machining on surface roughness of wood. **Building and Environment**, v. 41, p. 1074-1078, 2006.
58. 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.
59. KRATOCHVIL, R. **Fresamento de acabamento em altas velocidades de corte para eletrodos de grafita industrial**. 2004. 119p. Dissertação (Mestrado em Engenharia mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
60. LASZEWICZ, K. GORSKI, J. WILKOWSKI, J. Long-term accuracy of MDF milling process-development of adaptive control system corresponding to progression of tool wear. **Eur. J. Wood Prod**. 71:383–385. 2013.
61. 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.

62. LOPES, C.S.D. Caracterização da madeira de tres especies de eucalipto para uso em movelaria. 2007. 88p. Dissertação (mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
63. LYRA, PABLO V. A. **Desenvolvimento de uma Máquina Fresadora CNC Didática**. 2010. 123p. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2010.
64. MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. – 2. ed. – São Paulo: Blucher, 2011.
65. MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2009.
66. MAFFESSIONI, D. Análise da situação ambiental das indústrias do pólo moveleiro de Bento Gonçalves. 2012. 102p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minhas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 2012.
67. MAGOSS, E. **General Regularities of Wood Surface Roughness**. v.4. - Department Of Wood Engineering, University of West Hungary, Sopron, Hungary. p.81-86. 2008.
68. 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.
69. MARINHO, N. P. **Características das fibras do bambu (*dendrocalamus giganteus*) e potencial de aplicação em painéis de fibra de média densidade (MDF)** 2012, 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.
70. MARTINS, S. A.; FERRAZ, J. M.; SANTOS, C. M. T.; DEL MENEZZI, C. H. S.; SOUZA, M. R. Efeito da usinagem na Rugosidade da superfície da madeira de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica-RJ, v.18, n.2, p.135-143, 2011.
71. MELO, L. E. L. Influência da estrutura anatômica no consumo de energia especifica de corte da madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia*. . 2013. 93p. Dissertação. (Mestrado) Ciência e Tecnologia da Madeira - Madeira – Universidade Federal de Lavras - UFLA, 2013.
72. MOHEBBY, B. ILBEIGHI, F. KAZEMI-NAJAFI, S. Influence of hydrothermal modification of fibers on some physical and mechanical properties of médium density fiberboard (MDF). **Holz Roh Werkst**. V.66, p. 213-218, 2008.
73. NOVASKI, O. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2013.

74. ORLOWSKI, K. et al. Sawing frozen wood with narrow kerf saws: energy and quality effects. **Forest Products Journal**, Madison, v. 59, n. 3, p. 79-83, Mar. 2009
75. PINHEIRO, C. Efeitos do teor de umidade da madeira no fresamento de *Pinus elliottii*. 2014. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, UNESP – Univ. Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.
76. 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.
77. RIGATTI, A. M. Y. **Avaliação da força de usinagem e energia específica de corte no fresamento com alta velocidade de corte**. 2010. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.
78. ROSSI, G. C. KANENOBU, A. A. BATALHA, G. F. Relação Entre Parâmetros De Corte E Rugosidade Da Superfície Usinada. **Máquinas E Metais**, <http://www.arandanet.com.br>, V. Xli, N. 475, P. 156-163. 2005.
79. SAKLAKOGLU, I. E. KASMAN, S. Investigation of micro-milling process parameters for surface roughness and milling depth. **Int J Adv Manuf Technol**. V 54:567–578. 2011.
80. SALJE, E., DRUCKHAMMER, J., KEUCHEL, K. On-line measuring the edge roughness of wooden materials at machining. 1985.
81. SALONI, D. E.; LEMASTER, R. L.; JACKSON, S. D. Process Monitoring Evaluation and Implementation for the Wood Abrasive Machining Process. **Sensors**, p. 10401-10412, 2010.
82. 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.
83. SANTIAGO, L. F. F. **Caracterização da influência da velocidade de corte, pressão e granulometria de lixa no lixamento plano do *Pinus elliottii***. 2011. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011
84. SANTOS, S.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: SP: Artliber, p. 246, 2007.
85. SAVAS, V. OZAY, C. Analysis of the surface roughness of tangential turn-milling for machining with end milling cutter. **Journal of Materials Processing Technology** 18: 279–283. 2007.
86. SCM GROUP S.P.A (Italy). **Catálogo TECH Z1**, ITA – SPA, 2011. 24 p.



87. SEN, A.K. LITAK, G. SYTA, A. RUSINEK, R. Intermittency And Multiscale Dynamics In Milling Of Fiber Reinforced Composites. *Meccanica*. 48:783–789. 2013.
88. SHEN. XUE-HUI; ZHANG, JIANHUA; XING XING, DONGLIANG E ZHAO YUNFENG. A Study Of Surface Roughness Variation In Ultrasonic Vibration-Assisted Milling. *Int J Adv Manuf Technol*. 58:553–561. 2012.
89. SILVA, J.R.M. MUÑIZ, G.I.B. LIMA, J.T. BONDUELLE, A.F. Influência da morfologia das fibras na usinabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.3, p.479-487, 2005.
90. 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.
91. 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.
92. 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.
93. TEIXEIRA, V.C.M. **avaliação da usinagem da madeira de mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.)**. 2011. 45p. Monografia – Engenharia Florestal - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro- RJ. 2011.
94. TIBURCIO, U. F. O. **Medição e análise do acabamento superficial da madeira de eucalipto na usinagem de torneamento cilíndrico e lixamento**. 2009. 101f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.
95. TORQUATO, L.P. Caracterização dos painéis MDF Comerciais Produzidos no Brasil. 2008. 94f. Dissertação (Mestre Ciências Agrárias) Universidade Federal do Paraná. Curitiba-PR. 2008.
96. UEDA, T; HOSOKAWA, A; ODA, K; YAMADA, K. Temperature on flank face of cutting tool in high speed milling. Department of Mechanical Systems Engineering, Faculty of Engineering, Kanazawa University, Kodatsuno 2-40-20, **Kanazawa** 920-8667, Japan, 2001.
97. VALARMATHI, T.N. PALANIKUMAR, K. LATHA, B. Measurement and analysis of thrust force in drilling of particle board (PB) composite panels. **Measurement** 46: p 1220–1230. 2013.

98. VARANDA, L. D.; ALVES, M. C. S.; GONÇALVES, M. T. T.; SANTIAGO, L. F. F. A Influência das variáveis do lixamento tubular na qualidade das peças de *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Suplemento, v.16, p. 23-32, 2010.
99. 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.
100. XAVIER, F. A. Aspectos tecnológicos do torneamento do ferro fundido vermicular com ferramentas de metal-duro, cerâmica e CBN. 2003. 146f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica). Universidade federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC. 2003
101. XING, C.; ZHANG, S. DENG, J.; WANG, S. Investigation of the effects of bark fiber as core material and its resin content on three-layer MDF performance by response surface methodology. **Wood Science and Technology**.v.41 p 585-595, 2007.
102. ZAMARIAN, E. H. C.; ALBURQUERQUE, C. E.; MATOS, J.L.M, Usinagem Da Madeira De Bracatinga Para Uso Na Indústria Moveleira. **Floresta**, Curitiba, Pr, V. 42, N. 3, P. 631 - 638, Jul./Set. 2012.
103. ZHONG, Z.W. HIZIROGLU, S., CHAN, C.T.M. Measurement of the surface roughness of wood based materials used in furniture manufacture. **Measurement**, v. 46, p.1482-1487, 2013.