

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS EXPERIMENTAL DE ITAPEVA

REGINA DE SOUSA CAMILO

FRESAMENTO DE *Eucalyptus grandis*

Itapeva - SP

2013

REGINA DE SOUSA CAMILO

FRESAMENTO DE *Eucalyptus grandis*

Trabalho de Graduação apresentado no Campus Experimental de Itapeva - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como requisito para a conclusão do curso de Engenharia Industrial Madeireira.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves

Itapeva - SP
2013

Camilo, Regina de Sousa
C183f Fresamento de *Eucalyptus grandis* / Regina de Sousa
Camilo. – – Itapeva, SP, 2013
102 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado -
Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista,
Campus de Itapeva, 2013.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves
Banca examinadora: Prof. Dr. Manoel Cléber de
Sampaio Alves; Prof. Dr. Alexandre Jorge Duarte de Souza

Bibliografia

1. Usinagem. 2. Trabalhos em madeira- Ferramentas.
3. Eucalipto. I. Título. II. Itapeva - Curso de Engenharia Industrial Madeireira.

CDD 621.9

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Nelson e Maria

Aos meus irmãos: André e Cristina.

E a três pessoas muito especiais que infelizmente

Não se encontram mais neste plano:

Ao meu vô Zé Camilo, minha Tia Bete e a meu

Padrinho Marquinhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, força constante que me fez prosseguir nos momentos difíceis deste caminho, sendo meu guia, meu piloto, minha luz e meu norte.

Agradeço aos meus amados pais, Nelson e Maria, pelo amor incondicional, por serem exemplos de pessoas de bem e por sempre me apoiarem e por estarem sempre ao meu lado durante esta caminhada. Aos meus irmãos André e Cristina pela amizade e convivência e a Cris, que mesmo estando longe está sempre me ajudando. Aos meus cunhados Marília e Higor por se fazerem sempre presentes.

A minha amada Vó Bel por todo o seu amor! Com sua leveza e simplicidade sempre me encorajava para os desafios e me acolhia nos dias menos felizes.

Ao meu Vô Zé que era exemplo de humildade, alegria e fé inabalável e, que fazia aquele frango no molho que só o ele sabia fazer. A tia Bete que sempre escutava a todos e quando eu precisava me dizia: Alegria nesse coração menina!

Aos meus orientadores Doutores Manoel Cléber de Sampaio Alves e Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves pela amizade, dedicação, pelo comprometimento, pela confiança e por sempre darem o melhor em tudo que fazem. Obrigada por tudo!!!

Minha eterna gratidão aos professores doutores da Unesp: Prof. Maria Angélica, Prof. Alexandre, Prof. Cristiane, Prof. Manoel, Prof. Tadeu, Prof. Barreiros, por serem à base da minha formação.

Ao cursinho Pré-Vestibular “Cuca Fresca” do qual eu participo desde o começo da faculdade. Por todos esses anos ter me proporcionado momentos de alegria, e felicidade junto à vitória dos alunos.

As minhas amigas de infância: Lú, Van, Fer, Ma, Elaine e Dani.

Aos amigos da sétima turma que me acolheram: Tati, Dayane, Ingrid, Jenifer, Sueli, Mariane, Manu, Renata, Tiagão, Wartão, Sorocaba, Dellani, Bruno, André, Lego, Renatinho, Pupilo, Canário, Rennan, Bombeiro e principalmente ao Thierso pela imensa ajuda neste trabalho.

As meninas do futsal: Amanda, Bruna, Val, Lidya, Pri, Tati, Sueli, Glaucia, Lygia, Luana e Fer Di.

As repúblicas “Mansão das Encalhadas” e “Kebra Kabaça” pela hospitalidade e pelas melhores festas da facul. Valeu Bruna, Lígia, “Anas”, Val, Itala, Denise, Bárbara e Alione. E, também a Fer Di, Mariana Kaori e Clo pela amizade. Além de Diego, Bruno “Cabelo”, Saulo, Yuzo e Karla (5ª turma).

Aos amigos de longe: Dag, Vivi, Ana, Gaúcho, Pedrão, Damião, Fabíola, Ari, Juan (in memoriam), Nane, Thaís, Fabíola Calis e Neil.

A todos os professores, servidores e técnicos da UNESP de Itapeva por todos os ensinamentos ao longo dos anos de graduação.

Em especial aos técnicos Davi, Alex, Tiago e Valdecir.

Aos funcionários Melina, Deise, Cristian, André, Eli, Ricardo, Tiago, Valderez, Hélio, Aleson, Anderson, Lúcia, Miriam, Milton e seu Vicente.

A Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Experimental de Itapeva pela concessão de toda a infraestrutura de seus laboratórios e recursos necessários à realização deste trabalho.

RESUMO

O processo de fresamento de madeiras é muito utilizado em operações como aplainamento e fabricação de molduras. Máquinas como plainas, desengrossadeiras, tupias, moldureiras e centros de usinagem empregam o processo de fresamento para o corte da madeira. Neste trabalho foi estudado o processo de fresamento em centro de usinagem CNC de madeira de *Eucalyptus grandis* por ser esta uma espécie muito utilizada na fabricação de móveis, porém sem estudos consistentes relativos a este processo. Neste trabalho foi utilizado um centro de usinagem CNC da marca TECH Z1 para análise da qualidade superficial (R_a) em relação à variação da velocidade de corte e de avanço no fresamento tangencial concordante e discordante e no fresamento frontal. Utilizou-se madeira de *Eucalyptus grandis*. Foram utilizadas quatro velocidades de corte (5,9; 8,4; 10,9 e 13,4 m/s) e quatro velocidades de avanço (3; 5; 7; e 9 m/min). Utilizou-se para os ensaios uma fresa de acabamento de topo de aço rápido com dentes helicoidais de 16 mm de diâmetro. Foram realizadas 6 repetições para cada condição de ensaio. Com os resultados notou-se que os melhores resultados de rugosidade para $V_c = 10,9$ m/s foram obtidos no fresamento concordante a favor com a velocidade de avanço $V_f = 7$ m/min. Já para $V_f = 5$ m/min o melhor acabamento foi alcançado com $V_c = 8,4$ m/s no fresamento discordante a favor. A velocidade de avanço e de corte influenciaram na rugosidade. Os sentidos de corte concordante e frontal e discordante e frontal tiveram diferença significativa na rugosidade.

Palavras chaves: fresamento, velocidade de corte, velocidade de avanço, *Eucalyptus grandis*, rugosidade.

ABSTRACT

The process of milling wood is widely used in operations such as planing and manufacturing frames . Machines like planers , desengrossadeiras , routers , moldureiras and machining centers employ the milling process for cutting wood . In this work the process of milling CNC machining center of *Eucalyptus grandis* was studied because this is very much used in furniture , but without consistent studies on this process . This work a CNC machining center brand TECH Z1 for analysis of surface quality (R_a) in relation to the variation of cutting speed and feed in concordant and discordant tangential milling and face milling was used . We used *Eucalyptus grandis* . Four forward speeds (3, 5 , 7, and 9 m / min) for four shear rates (5,9; 8,4; 10,9 and 13,4 m/s) were used. Was used for testing a cutter finishing top speed steel with helical teeth 16mm in diameter . 6 repetitions for each test condition were performed . From the results it was observed that the best results for roughness $V_c = 10,9$ m / s were obtained for the milling concordant with the forward speed $V_f = 7$ m / min. As for $V_f = 5$ m / min the best finish was achieved with $V_c = 8,4$ m /s in discordant for milling . The feedrate and cutting influenced the roughness . The senses of concordant and discordant and cut the top and the top had a significant difference in roughness .

Key words: milling, cutting speed, feedrate, *Eucalyptus grandis*, roughness.

Sumário

DEDICATÓRIA.....	iv
AGRADECIMENTO.....	v
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	xii
LISTA DE TABELAS.....	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO.....	3
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 PROCESSOS DE USINAGEM.....	4
3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE USINAGEM.....	5
3.2.1 Classificação quanto ao processo de remoção de material.....	5
3.2.2 Classificação quanto à geometria da ferramenta de corte.....	6
3.2.3 Classificação quanto à finalidade da operação de corte.....	6
3.3 MOVIMENTOS E GRANDEZAS NOS PROCESSOS DE USINAGEM	8
3.3.1 MOVIMENTOS ENTRE A ARESTA DE CORTE E A PEÇA	8

3.3.2. VELOCIDADES E PERCURSOS.....	9
3.4 GRANDEZAS DOS PROCESSOS DE USINAGEM.....	11
3.4.1 Grandezas de Avanço.....	11
3.4.2 Grandezas de Penetração	12
3.4.3 Grandezas de Corte.....	14
3.5 PROCESSO DE FRESAMENTO.....	14
3.5.1 FRESAMENTO CONCORDANTE.....	19
3.5.2 FRESAMENTO DISCORDANTE.....	22
3.5.3 FRESAS.....	25
3.6 ACABAMENTO SUPERFICIAL.....	29
3.7 MÁQUINAS CNC.....	32
3.7.1 Fresadora CNC.....	33
3.7.1.1 A Máquina Furadeira - Fresadora CNC Tech Z1.....	35
3.7.2 Descrição da máquina.....	35
3.7.3 Descrição dos grupos operadores	38
3.8 A MADEIRA DE <i>EUCALYPTUS GRANDIS</i>	40
4.0 MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
4.1 AS PEÇAS DE MADEIRA.....	41
4.2 CÁLCULO DA VELOCIDADE DE CORTE (V_c).....	43
4.2.1 Velocidade de Avanço (V_f).....	44
4.3 MÁQUINAS UTILIZADAS.....	44
4.3.1 Serra Seccionadora.....	44

4.3.2 Furadeira - Fresadora CNC Tech Z1.....	45
4.3.2.1 Programas utilizados (CNC)	46
4.3.2.2 Configuração dos Comandos Numéricos	47
4.4 FERRAMENTA UTILIZADA.....	49
4.5 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE.....	50
4.6 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO.....	52
4.7 TABELA DE DADOS.....	55
4.8 MADEIRA DE EUCALIPTO.....	56
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
5.1.1 Fresamento discordante a favor.....	57
5.1.2 Fresamento discordante contra.....	60
5.1.3 Fresamento discordante a favor.....	63
5.1.4 Fresamento concordante contra.....	67
5.1.5 Fresamento frontal perpendicular.....	69
5.1.6 Fresamento frontal paralelo.....	71
5.2 RESULTADO DA ANÁLISE DOS GRUPOS.....	74
5.2.1 Grupo A ($V_c = 10,9 \text{ m/s}$)	74
5.2.2 Grupo B ($V_f = 5 \text{ m/min}$).....	75
6. CONCLUSÃO.....	77
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
8 ANEXO A.....	83

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Alguns processos de fresamento: a) cilíndrico tangencial; b) cilíndrico tangencial concordante; c) cilíndrico tangencial discordante; d) frontal; e) frontal de canal com fresa de topo; f) composto. (Apostila de Processos de Fabricação de Usinagem - UFRGS, acesso: 2013)	5
Figura 2 - Processos de Fabricação (Apostila de Processos de Fabricação de Usinagem - UFRGS, acesso: 2013).....	7
Figura 3 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no fresamento discordante. (Apostila de Usinagem dos Metais – Gonçalves: acesso 2013).....	10
Figura 4 - Percurso de corte L_c , percurso de avanço L_f e percurso efetivo L_e do ponto de corte escolhido, na operação de fresamento discordante. No exemplo, L_c é obtido através da penetração de trabalho A_e (Apostila de Usinagem dos Metais – Gonçalves: acesso 2013).....	11
Figura 5 - Avanço por dente f_z e avanço de corte f_c no fresamento discordante. (Apostila de Usinagem dos Metais – Gonçalves: acesso 2013)	12
Figura 6 - Profundidade de usinagem a_p , penetração de trabalho a_e e penetração de avanço a_f no fresamento tangencial. (Apostila de Usinagem dos Metais – Gonçalves: acesso 2013).....	13
Figura 7 - Profundidade de usinagem a_p , penetração de trabalho a_e e penetração de avanço a_f no fresamento frontal. (Apostila de Usinagem dos Metais – Gonçalves: acesso 2013).....	14
Figura 8 - Principais operações executadas na fresadora. Machado <i>et al</i> (2009).....	16

Figura 9 - Fresamento frontal e fresamento tangencial. König e Klocke (1999).....	18
Figura 10 - Fresamento cilíndrico tangencial concordante. Stemmer (1995).....	19
Figura 11 - Geometria do Fresamento Concordante. (Norma ABNT 6162/88 in Gonçalves, 2000).....	21
Figura 12 - Fresamento cilíndrico tangencial discordante. Stemmer (1995)	22
Figura 13 - Geometria do Fresamento Discordante. (Norma ABNT 6162/88 - Gonçalves, 2000).....	23
Figura 14 - Percurso de corte (l_c), percurso de avanço (l_f) e percurso efetivo (l_e); profundidade de corte (a_e), no fresamento discordante (Norma ABNT 6162/88 in Gonçalves, 2000).....	24
Figura 15 - Avanço por dente (f_z), avanço de corte (f_c) e avanço efetivo (f_e) no fresamento discordante (Norma ABNT 6162/88 in Gonçalves, 2000).	24
Figura 16 - Fresa de dente reto. Stemmer (1992).....	26
Figura 17 - Fresa helicoidal. Stemmer (1992).....	26
Figura 18 - Fresa de disco de dentes retos, de três cortes. Stemmer (1992).....	26
Figura 19 - Fresa cilíndrica de disco de dentes cruzados. Stemmer (1992).....	27
Figura 20 - Fresas frontais angulares. Stemmer (1992).....	27
Figura 21 - Fresa prismática. Stemmer (1992).....	27
Figura 22 - Fresa de topo de haste cilíndrica. Stemmer (1992).....	28
Figura 23 - Fresa de topo para “ranhurar” de haste cilíndrica. Stemmer (1992).....	28

Figura 24 - Fresa cilindro frontal postiça. Stemmer (1992).....	28
Figura 25 - Fresa de haste para ranhuras T. Stemmer (1992).....	28
Figura 26 - Fresa de talonada semicircular convexa. Stemmer (1992)..	29
Figura 27 - Rugosidade média e perfil de rugosidade (ISO 4287, 2002)	31
Figura 28 - Elementos de máquina da Fresadora (COSTA 2006).....	34
Figura 29 - A máquina Furadeira - Fresadora CNC Tech Z1 (Catálogo TECH Z1 2011).....	36
Figura 30 - Esquema da estrutura da máquina (Catálogo TECH Z1 2011- adaptado).....	37
Figura 31 - Plano de eixos utilizado pelo equipamento (Catálogo TECH Z1 2011- adaptado).....	37
Figura 32 - Dispositivo com ventosa para a fixação das peças (Catálogo TECH Z1 2011- adaptado).....	38
Figura 33 - Armário elétrico G e painel de controle móvel G1 (Catálogo TECH Z1 2011- adaptado).....	38
Figura 34 - (a) Unidade de operação e (b) Mandril (Catálogo TECH Z1 2011- adaptado).....	39
Figura 35 - Dispositivo lateral de 10 posições (Catálogo TECH Z1 - adaptado).....	39
Figura 36 - Painel de sarrafos de madeira de <i>eucalyptus grandis</i>	41
Figura 37 – Dados da usinagem dos painéis de sarrafos de madeira de <i>eucalyptus grandis</i>	42
Figura 38 – Corpo de prova do fresamento frontal.....	43
Figura 39 – Corpo de prova do fresamento tangencial.....	43
Figura 40 - Serra seccionadora TECMATIC – marca e modelo (ALMEIDA, 2013).....	45

Figura 41 - Furadeira – Fresadora CNC Tech Z1 (SCM GROUP S. P. A. – Manual de Instruções; ALMEIDA, 2013)	45
Figura 42 - Dados Técnicos Gerais (SCM GROUP S.P. A – Manual de Instruções, 2011).....	46
Figura 43 - Software Xilog Plus (ALMEIDA, 2013).....	47
Figura 44 - Programa de Comando Numérico de base para os ensaios. (ALMEIDA, 2013).....	48
Figura 45 - Fresa de acabamento (Fabricante: CMT).....	49
Figura 46 - Rugosímetro Modelo SURTRONIC 25+; marca TAYLOR HOBSON. (ALMEIDA, 2013).....	50
Figura 47- Haste de medição.....	51
Figura 48 - Ponta apalpadora cone-esférico de diamante.....	51
Figura 49 - Painéis de sarrafos de madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	52
Figura 50 - Parâmetros adotados no software Xilog Plus.....	53
Figura 51 - Posicionamento da peça na CNC.....	54
Figura 52 - Peça sendo cortada na serra seccionadora.....	54
Figura 53 – Corpos de prova depois de prontos e identificados.....	55
Figura 54 - Rugosidade no sentido discordante a favor para diferentes velocidades de avanço.....	61
Figura 55 - Rugosidade no sentido discordante a favor para diferentes velocidades de corte.....	62
Figura 56 - Rugosidade no sentido discordante contra para diferentes velocidades de avanço.....	64
Figuram 57 - Gráfico de rugosidade no sentido concordante a favor para diferentes velocidades de avanço.....	65

Figura 58 - Gráfico de rugosidade no sentido concordante a favor para diferentes velocidades de corte.....	66
Figura 59 – Gráfico de rugosidade no sentido concordante contra para diferentes velocidades de avanço.....	67
Figura 60 - Gráfico de rugosidade no sentido concordante contra para diferentes velocidades de corte.....	68
Figura 61 - Gráfico de rugosidade no sentido frontal perpendicular para diferentes velocidades de avanço.....	69
Figura 62 - Gráfico de rugosidade no sentido frontal perpendicular para diferentes velocidades de corte.....	70
Figura 63 - Gráfico de rugosidade no sentido frontal paralelo para diferentes velocidades de avanço.....	71
Figura 64 - Gráfico de rugosidade no sentido frontal paralelo para diferentes velocidades de corte.....	72
Figura 65 - Gráfico de rugosidade no sentido frontal paralelo para diferentes velocidades de corte.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Critérios de classificação do fresamento. (HIOKI, 2006 – Adaptado).....	17
Tabela 2. Parâmetros de amplitude mais comuns em perfis de rugosidade	30
Tabela 3. Grupos e seus conjuntos.....	56
Tabela 4. Dados Eucalipto.....	56
Tabela 5. Valores médios de densidade básica e aparente para o <i>eucalyptus grandis</i>	57
Tabela 6. Rugosidade Ra (μm) com velocidade de avanço (v_a) variando e $V_c = 10,9 \text{ m/s}$	58
Tabela 7. Rugosidade (μm) com Velocidade de corte variando e $v_f = 5 \text{ m/min}$	59
Tabela 8. Valores médios de rugosidade no sentido discordante a favor para diferentes velocidades de corte.....	60
Tabela 9. Valores médios de rugosidade no sentido discordante a favor para diferentes velocidades.....	61
Tabela 10. Valores médios de rugosidade no sentido discordante contra para diferentes velocidades de avanço.....	62
Tabela 11. Valores médios de rugosidade no sentido discordante contra para diferentes velocidades de corte.....	62
Tabela 12. Valores médios de rugosidade no sentido concordante a favor para diferentes velocidades de avanço.....	63
Tabela 13. Valores médios de rugosidade no sentido concordante a favor para diferentes velocidades de corte.....	64
Tabela 14. Valores médios de rugosidade no sentido concordante contra para diferentes velocidades de avanço.....	65
Tabela 15. Valores médios de rugosidade no sentido concordante contra para diferentes velocidades de corte.....	66
Tabela 16. Valores médios de rugosidade no sentido frontal perpendicular para diferentes velocidades de avanço.....	67
Tabela 17. Valores médios de rugosidade no sentido frontal perpendicular para diferentes velocidades de corte.....	68

Tabela 18. Valores médios de rugosidade no sentido frontal paralelo para diferentes velocidades de avanço.....	69
Tabela 19. Valores médios de rugosidade no sentido frontal paralelo para diferentes velocidades de corte.....	70
Tabela 20. Análise de variância de rugosidade no fresamento do <i>eucalyptus grandis</i> para o grupo A.....	71
Tabela 21. Teste Tukey.....	72
Tabela 22. Teste Tukey:.....	73
Tabela 23. Análise de variância de rugosidade no fresamento do <i>eucalyptus grandis</i> para o grupo B.....	74
Tabela 24. Teste Tukey.....	75
Tabela 25. Teste Tukey.....	76

1 INTRODUÇÃO

Hoje em dia a qualidade dos produtos é uma das características que mais são levadas em conta nos processos de fabricação. A maioria das empresas realiza inspeções e controle de qualidade dos produtos de madeira, conforme as especificações e normas indicadas pelos clientes, contemplando a verificação do acabamento superficial, que define a qualidade final das peças usinadas, e a necessidade ou não de operações posteriores. Dessa maneira é muito importante conhecer o acabamento superficial através da rugosidade da peça e a magnitude das forças envolvidas no processo, tanto para fazer o projeto destes produtos como para as máquinas-ferramentas que irão produzi-los. Além de ser importantíssimo o conhecimento das correlações existentes entre rugosidade e as forças de corte e os parâmetros de corte, tais como o avanço, a velocidade de corte, e a profundidade de corte, para que possam ser escolhidos da melhor forma possível de acordo com cada tipo de operação. Outro fator que deve ser levado em conta é o acabamento superficial, que define a qualidade final das peças usinadas, e a necessidade ou não de operações posteriores.

O fresamento é um dos mais importantes processos de usinagem dado sua alta precisão, produtividade e flexibilidade. Os avanços tecnológicos dos equipamentos e ferramentas tornam o fresamento cada vez mais versátil e competitivo, atingindo níveis de tolerâncias cada vez mais altos.

A constante ampliação de sua utilização na manufatura e em máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado) é explicada pelos extraordinários níveis de acabamento e a possibilidade de geometrias diferentes e complexas.

A partir da década de 80 a evolução dos materiais de ferramentas de corte e das máquinas permitiu o corte a altas velocidades na indústria.

O principal fator que estimulou o desenvolvimento do fresamento foi à redução nos tempos de fabricação, seja do próprio processo de fresamento como de processos de acabamento subsequentes. O fresamento tornou

possível o uso de ferramentas de pequeno diâmetro e a obtenção de geometrias mais próximas da geometria final da peça.

A automação industrial é uma realidade em quase todos os ramos da indústria e a indústria de móveis também seguiu essa tendência. Iniciou esse processo quando a produção de móveis deixou de ser artesanal, com os marceneiros, e passou a ser produção em série. Seguindo essa tendência, as empresas de móveis investiram em equipamentos com tecnologia de ponta e grande capacidade produtiva. A alternativa para essa solicitação foi à implantação de máquinas com Comando Numérico Computadorizado (CNC). Dentre as etapas de produção de móveis, a que mais recebeu auxílio foi à área da usinagem da madeira, fabricando os mais complexos tipos de peças, trazendo qualidade aos cortes, precisão, flexibilidade e diminuição de tempo.

Juntamente a esta evolução em tecnologia de usinagem, os materiais utilizados na fabricação de móveis vem deixando de ser madeiras nativas e estão sendo usadas madeiras de pinus e eucaliptos devido seu rápido crescimento e rápido desenvolvimento. Uma destas madeiras que vem participando cada vez deste setor industrial é o *Eucalyptus grandis* sendo necessário, portanto, estudos de como é seu comportamento durante a usinagem por processo de fresamento.

Dentro deste contexto, este trabalho tem como objetivo a análise de fresamento de peças de madeira de *Eucalyptus grandis* em uma máquina CNC. Coletando dados através de ensaios e relacionando com as variáveis do processo, determinando com isso a qualidade superficial através da medição da rugosidade.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Analisar o acabamento superficial no processo de fresamento da madeira de *Eucalyptus grandis* em centro de usinagem CNC utilizando ferramenta de topo helicoidal.

2.2 Objetivos específicos

- Comparar a qualidade superficial obtida com o fresamento concordante, o fresamento discordante e frontal;
- Verificar a qualidade obtida quando a rugosidade é medida a favor ou contra a velocidade de corte;
- Verificar a influência da velocidade de corte e da velocidade de avanço na rugosidade;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os principais temas tratados neste trabalho como: processos de usinagem, movimentos e grandezas nos processos de usinagem, processo de fresamento, acabamento superficial, máquinas CNC e a madeira de *Eucalyptus grandis*.

3.1 PROCESSOS DE USINAGEM

Em alguma de suas etapas de produção a maior parte dos produtos industrializados sofre algum processo de usinagem. A compreensão de seus conceitos e de suas variáveis é de fundamental importância para a qualidade dos produtos no setor industrial.

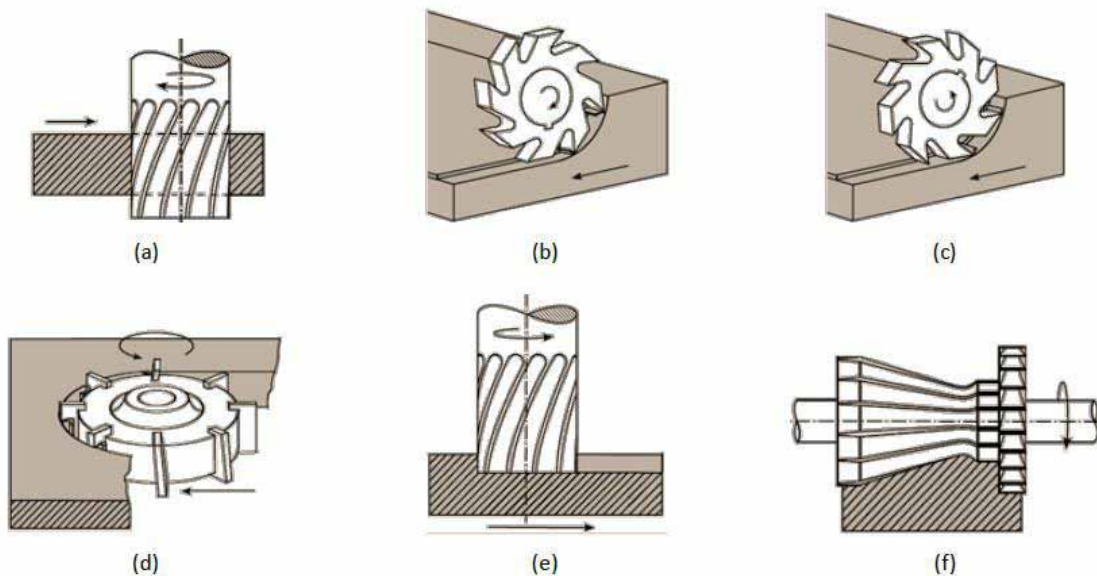
Segundo Ferraresi (1969) operações de usinagem são aquelas que conferem à peça a forma ou as dimensões ou o acabamento ou pode ser ainda uma combinação dos três itens produzindo cavaco. Sendo cavaco a porção de material da peça, que foi retirada pela ferramenta e apresenta forma geométrica irregular.

Vários fatores devem ser considerados quando se escolhe um processo de fabricação. Como, por exemplo:

- Forma e dimensão da peça;
- Material a ser empregado e suas propriedades;
- Quantidade de peças a serem produzidas;
- Tolerâncias e acabamento superficial requerido.

Entre os principais processos de usinagem pode-se citar: o torneamento, o aplainamento, a furação, o alargamento, o rebaixamento, o mandrilamento, o fresamento, o serramento, o brochamento, o roscamento, a limagem e o lixamento. Na Figura 1 abaixo são mostrados alguns processos de fresamento:

Figura 1 - Alguns processos de fresamento: a) cilíndrico tangencial; b) cilíndrico tangencial concordante; c) cilíndrico tangencial discordante; d) frontal; e) frontal de canal com fresa de topo; f) composto. (Apostila de Processos de Fabricação de Usinagem - UFRGS, acesso: 2013).



3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE USINAGEM

Segundo Souza (2011) a classificação dos processos de usinagem pode ocorrer segundo:

3.2.1 Classificação quanto ao processo de remoção de material

O processo de remoção por usinagem pode ser dividido em dois tipos:

- Processos convencionais: onde as operações de corte utilizam energia mecânica na remoção do material, principalmente por cisalhamento, ou seja, no contato físico da ferramenta com a peça. Ex.: torneamento, furação e retificação.

- Processos especiais (não convencionais): onde as operações utilizam outros tipos de usinagem (ex: termoelétrica) não geram marcas-padrão na superfície da peça além de que a taxa volumétrica de remoção de material ser menor que nos processos convencionais. Ex: laser (radiação), eletroerosão (elétrons) e plasma (gases quentes).

3.2.2 Classificação quanto à geometria da ferramenta de corte

Os processos convencionais de usinagem podem ainda ser subdivididos em dois tipos:

- Operações de corte com ferramentas de geometria definida (ou seja, as arestas cortantes tem formato e tamanhos conhecidos). Ex.: torneamento, furação, fresamento.
- Operações de corte com ferramentas de geometria não definida (ou seja, partículas abrasivas com formatos aleatórios e compostas por minúsculas arestas de corte). Ex.: retificação, lixamento, brunimento, lapidação.

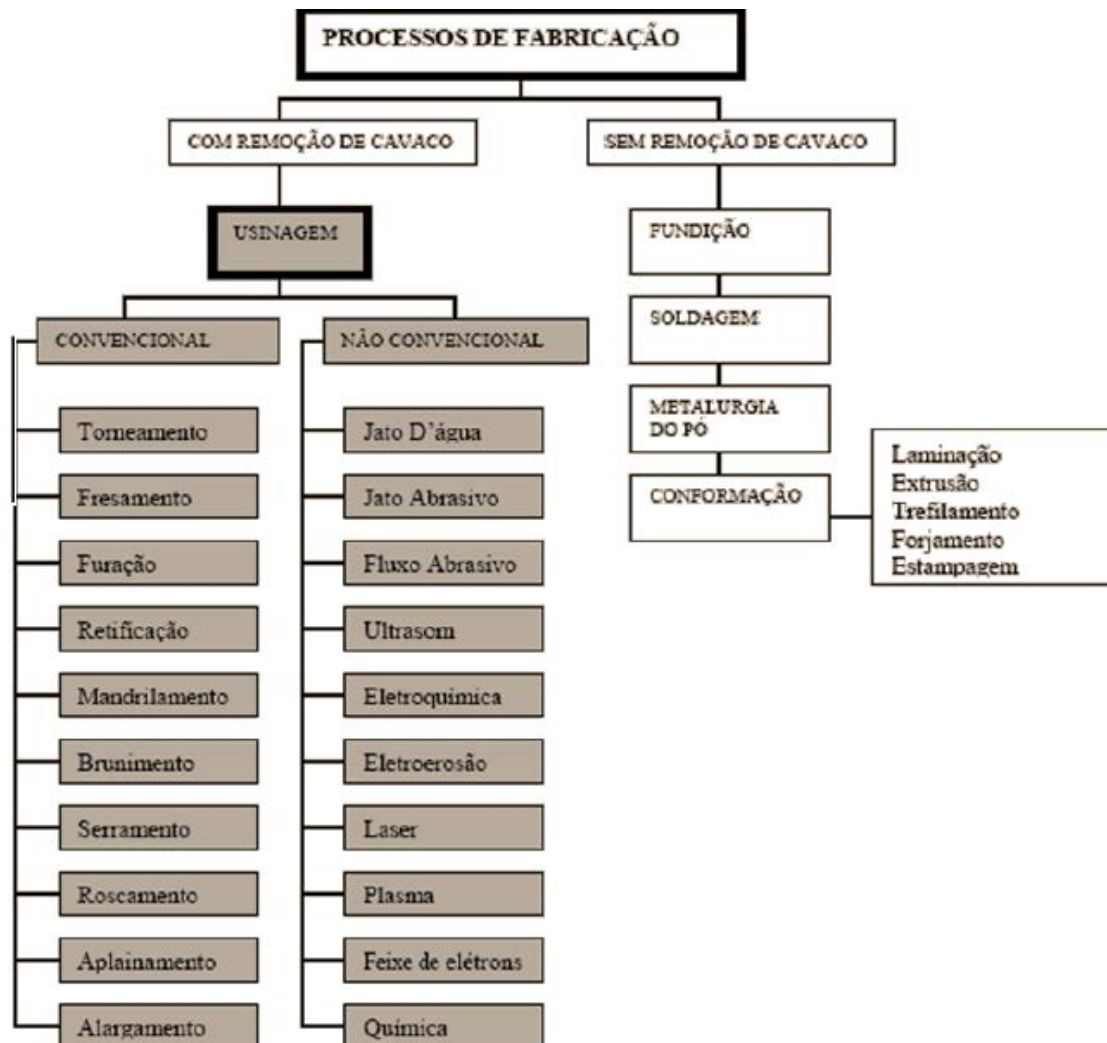
3.2.3 Classificação quanto à finalidade da operação de corte

Com relação à finalidade, as operações de usinagem se classificam em:

- Operações de desbaste: onde a usinagem é anterior a de acabamento, visando obter na peça a forma e dimensões próximas das finais.
- Operações de acabamento: onde a usinagem visa obter as dimensões finais, ou um acabamento específico ou ainda ambos.

Assim podemos dividir os processos de fabricação de materiais em: os com remoção de cavaco e os sem remoção de cavaco. A Figura 2 abaixo mostra a classificação dos processos de fabricação, destacando as principais operações de usinagem.

Figura 2 - Processos de Fabricação (Apostila de Processos de Fabricação de Usinagem - UFRGS, acesso: 2013).



3.3 MOVIMENTOS E GRANDEZAS NOS PROCESSOS DE USINAGEM

3.3.1 MOVIMENTOS ENTRE A ARESTA DE CORTE E A PEÇA

A seguir são apresentadas algumas definições fundamentais para a compreensão do processo de usinagem (GONÇALVES, 2002).

Os movimentos descritos abaixo se referem à peça considerada parada e classificam-se como ativos ou passivos. Os movimentos de corte e de avanço são considerados ativos quando houver remoção de material, quando em conjunto originam o movimento efetivo (Figuras 3, 4 e 5), o qual é responsável pela produção dos cavacos. Os demais movimentos, não geram remoção de material apesar de fundamentais para a realização do processo de usinagem.

Movimento de corte: Direcionado pelo vetor velocidade de corte, de modo isolado gera remoção de material durante uma única rotação ou um curso da ferramenta.

Movimento de avanço: Direcionado pelo vetor velocidade de avanço, junto com o movimento de corte, permite uma remoção contínua ou repetida do cavaco.

Movimento efetivo: Resultante dos movimentos de corte e de avanço, direcionado pelo vetor velocidade efetiva de corte.

Movimento de ajuste: É aquele no qual é pré-determinada a largura da camada de material a ser removida.

Movimento de correção: Movimento onde há compensação do desgaste, variações de posição de origem térmica, deformações plásticas, entre outras.

Movimento de aproximação: Movimento que ocorre antes da usinagem, com o qual a ferramenta é aproximada à peça.

Movimento de recuo: Movimento que ocorre após a usinagem, com o qual a ferramenta é afastada da peça.

Todos os movimentos estão associados a tempos, os quais somados resultam no tempo total de produção.

3.3.2. VELOCIDADES E PERCURSOS

Ainda segundo Gonçalves (2002), conforme norma ABNT 6162 – Conceitos da Técnica de Usinagem – Movimentos e Relações Geométricas, os parâmetros de velocidades e de percursos (Figuras 3 e 4) são descritos como:

V_C = Velocidade instantânea do movimento de corte

V_f = Velocidade instantânea do movimento de avanço

V_e = Velocidade instantânea do movimento efetivo

L_C = Percurso de corte

L_f = Percurso de Avanço

L_e = Percurso efetivo

Nas operações onde os movimentos de corte e de avanço não ocorrem ao mesmo tempo (ex.: aplainamento e brochamento), a velocidade de corte é o resultado do deslocamento da ferramenta em relação à peça num determinado tempo. No caso da combinação dos movimentos de corte e de avanço (ex.: torneamento, fresamento, retificação e furação) a velocidade de corte é dada pela expressão:

$$V_C = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}$$

Eq. (1) onde:

V_c = velocidade de corte [m/min]

d = diâmetro da peça ou da ferramenta [mm]

n = rotação da peça ou da ferramenta [rpm]

A velocidade de avanço é dada pelo deslocamento por curso da ferramenta ou pelo produto do avanço pela rotação para usinagem rotativa (peça ou ferramenta).

$$V_f = f \cdot n = \frac{1000 \cdot V_c \cdot f}{\pi \cdot d}$$

Eq. (2) onde:

V_f = velocidade de avanço [mm/min]

f = avanço [mm/volta]

Figura 3 - Direção dos movimentos de corte, de avanço e efetivo no fresamento discordante. .(Apostila de Usinagem dos Metais – Gonçalves: acesso 2013)

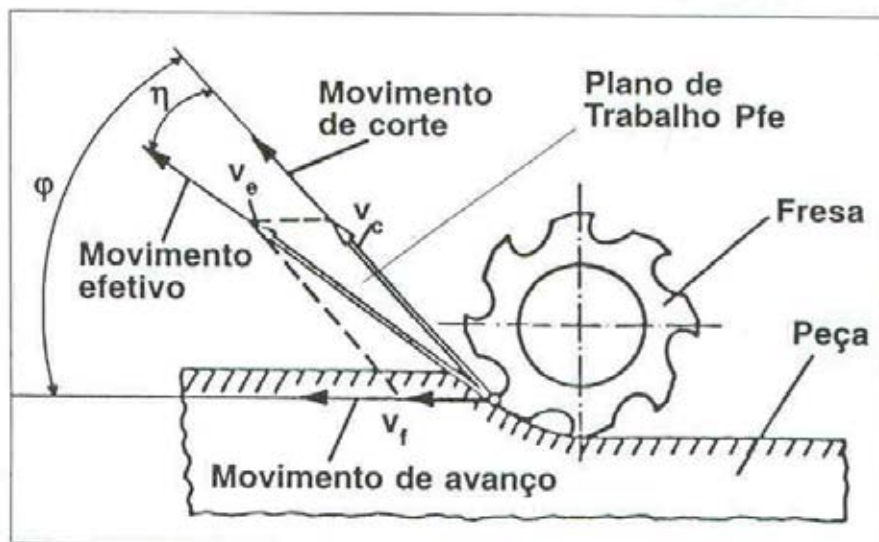
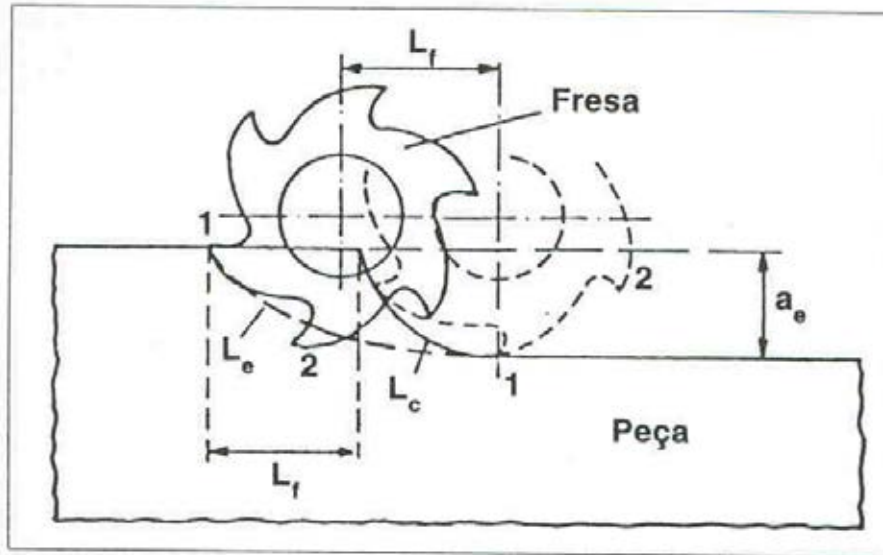


Figura 4 - Percurso de corte L_c , percurso de avanço L_f e percurso efetivo L_e do ponto de corte escolhido, na operação de fresamento discordante. No exemplo, L_c é obtido através da penetração de trabalho A_e (Apostila de Usinagem dos Metais – Gonçalves: acesso 2013).



3.4 GRANDEZAS DOS PROCESSOS DE USINAGEM

3.4.1 Grandezas de Avanço

Avanço por dente (f_z): Percurso de avanço por dente ou da aresta de corte, medido no plano de trabalho. O avanço por dente é a distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem, medida na direção de avanço (Figura 5). Tem-se assim:

$$f_z = \frac{f}{Z}$$

Eq. (3) onde:

Z = número de dentes ou arestas de corte

f = avanço (mm/volta)

Para ferramentas monocortantes $f_z = f$ (ex: torneamento, aplainamento ou fresamento com fresas de um único dente).

Avanço de corte (f_c): Distância entre duas superfícies consecutivas em usinagem, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de corte (Figura 6). Tem-se:

$$f_c = f_z \cdot \sin \varphi$$

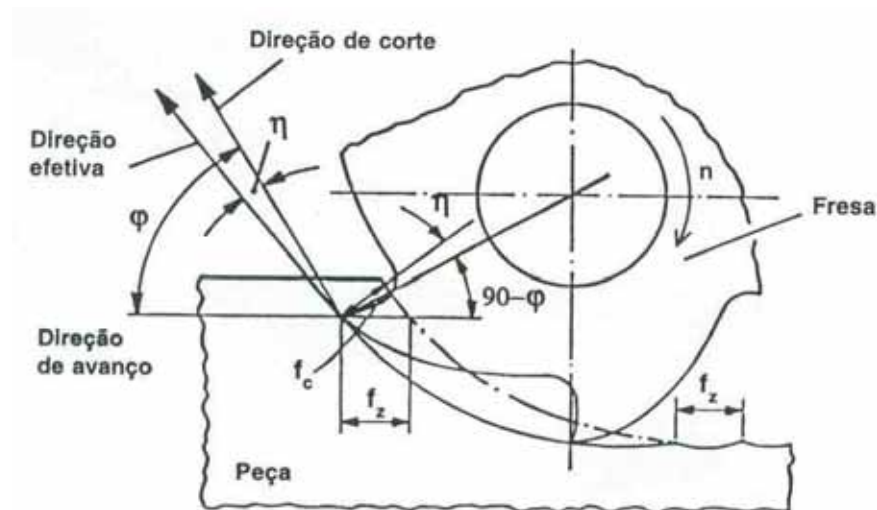
Eq. (4)

Nos processos de usinagem onde $\varphi = 90^\circ$, tem-se:

$$f_c = f_z = f$$

Eq. (5)

Figura 5 - Avanço por dente f_z e avanço de corte f_c no fresamento discordante. (Apostila de Usinagem dos Metais – Gonçalves: acesso 2013)



3.4.2 Grandezas de Penetração

Profundidade ou largura de usinagem (a_p) : Profundidade ou largura de penetração da ferramenta, medida perpendicularmente ao plano de trabalho (Figuras 6 e 7).

- No torneamento cilíndrico e de faceamento, fresamento e retificação frontal, a_p corresponde à profundidade de usinagem.
- No sangramento (torneamento com bedame), brochamento, fresamento e retificação tangencial, a_p corresponde à largura de usinagem.
- Na furação, a_p corresponde à metade do diâmetro da broca.

Penetração de trabalho (a_e): Grandeza de penetração da ferramenta, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de avanço (Figuras 6 e 7).

Penetração de avanço (a_f): Grandeza de penetração da ferramenta, medida na direção de avanço (Figuras 6 e 7).

Figura 6 - Profundidade de usinagem a_p , penetração de trabalho a_e e penetração de avanço a_f no fresamento tangencial. (Apostila de Usinagem dos Metais – Gonçalves: acesso 2013)

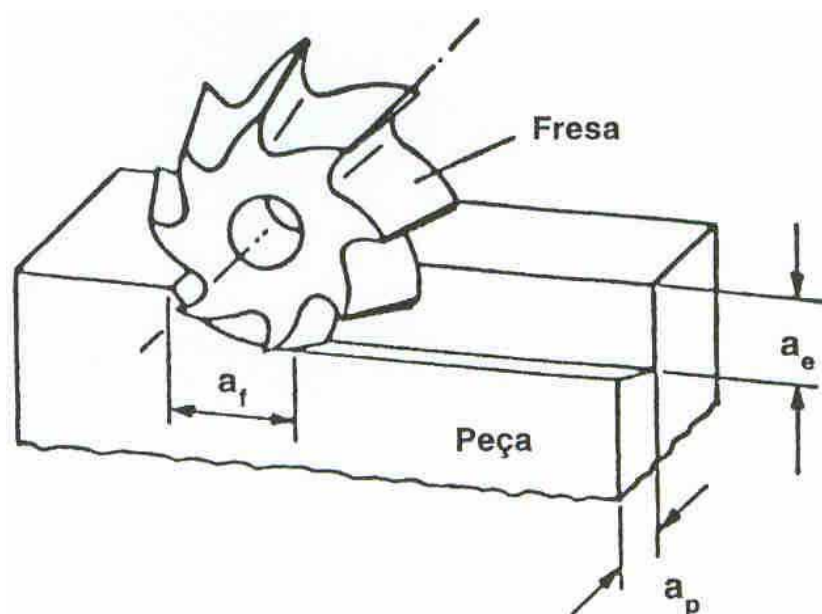
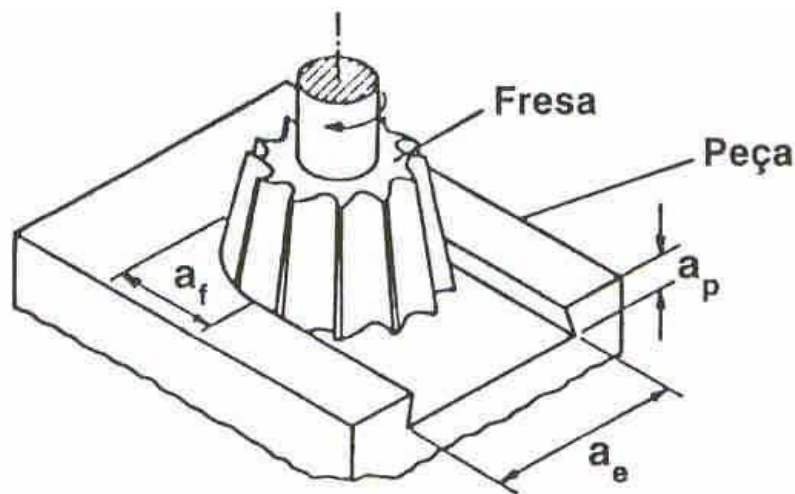


Figura 7 - Profundidade de usinagem a_p , penetração de trabalho a_e e penetração de avanço a_f no fresamento frontal. (Apostila de Usinagem dos Metais – Gonçalves: acesso 2013)



3.4.3 Grandezas de Corte

Seção transversal de corte (A): Área calculada da seção transversal de um cavaco a ser removido, medida perpendicularmente à direção de corte. Expressa por:

$$A = a_p \cdot f$$

Eq. (6)

3.5 PROCESSO DE FRESAMENTO

O processo de fresamento, mesmo complexo é um dos processos de usinagem mais empregados na indústria atualmente, possuindo grande variação quanto ao tipo de máquina utilizado, movimento da peça e tipos de ferramentas. Responsável pela alta taxa de remoção de material e produção de formas com boa precisão dimensional e geométrica, além de possuir elevada flexibilidade, sendo usado na fabricação de inúmeras superfícies, tais como

superfícies planas, contornos, rasgos, ranhuras, cavidades, perfis, roscas, entre outros, (MARCELINO *et al*, 2004).

Como característica do processo de fresamento, tem-se a velocidade de avanço da peça bem inferior à velocidade de rotação da ferramenta. Como vantagens do processo tem-se altas taxas de remoção e a obtenção de superfícies de elevada qualidade e complexidade, (STEMMER, 1995; DROZDA E WICH, 1983; KÖNING E KLOCKE, 1999).

Segundo Stemmer (1995) o fresamento é um processo de usinagem no qual ocorre a remoção de material da peça de modo intermitente, pelo movimento rotativo da ferramenta, geralmente multicortante, denominada fresa.

Segundo Sandvik (2005) o fresamento é basicamente o corte de materiais com uma ferramenta rotativa de múltiplas arestas de corte executando movimentos programados sobre uma peça em quase todos os sentidos de direção.

Já para Diniz, Marcondes e Coppini (2006) a operação de fresamento tem as seguintes características:

- A ferramenta, chamada fresa, é provida de arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo.
- O movimento de corte é proporcionado pela rotação da fresa ao redor de seu eixo.
- O movimento de avanço é feito pela própria peça que está sendo usinada, que está fixa na mesa da máquina, o qual obriga a peça a passar pela ferramenta em rotação, que irá dar a forma dimensões desejadas.

As principais operações do fresadora são mostradas na Figura 8:

Figura 8 - Principais operações executadas na fresadora. Machado et al (2009)



O fresamento pode ser classificado segundo os critérios da Tabela 1, a seguir:

Tabela 1. Critérios de classificação do fresamento. (HIOKI, 2006 – Adaptado).

Forma de ferramenta e cinemática	Plano Circular Geração Forma perfil
Sentido de rotação e avanço da peça	Concordante Discordante
Disposição da aresta ativa	Tangencial Frontal (arestas secundárias)

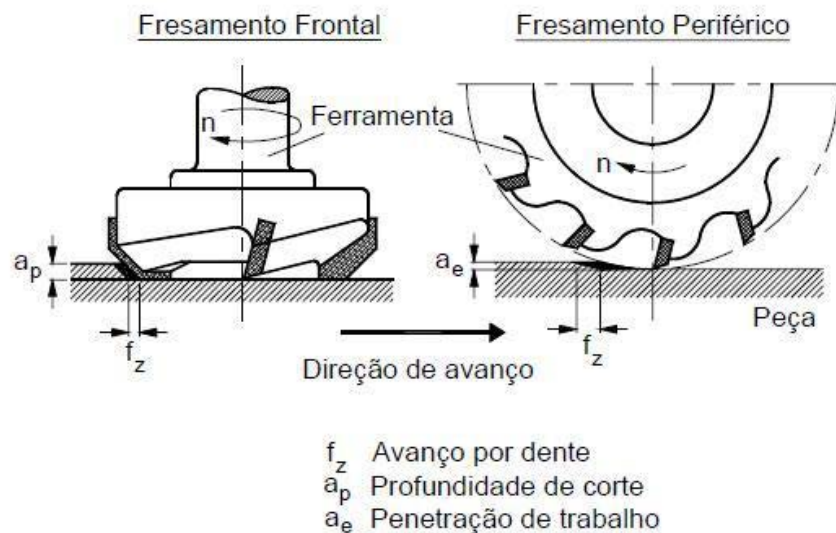
O fresamento pode ser diferenciado dos outros processos de usinagem com rotação de ferramenta (como furação, mandrilamento, rosqueamento, trepanação entre outros) pela atuação simultânea de somente parte das arestas de corte (corte interrompido). (GROOVER, WEINGAERTNER e SCHROETER, 2002).

Segundo Ferraresi (1969), o fresamento é um processo mecânico de usinagem à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas multicortantes. Onde a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer. Para Diniz, Marcondes e Coppini (2006), conforme a disposição dos dentes ativos da fresa, distinguem-se dois tipos básicos de fresamento:

- Fresamento Tangencial ou Periférico = processo de fresamento destinado à obtenção de superfície plana paralela ao eixo de rotação da ferramenta (figura 9). Os dentes ativos da fresa se encontram na superfície cilíndrica da ferramenta, o eixo da fresa fica paralelo à superfície usinada. As fresas que fazem este tipo de corte são chamadas de fresas cilíndricas ou tangenciais.
- Fresamento Frontal ou Faceamento = processo de fresamento destinado à obtenção de superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta (figura 9). Os dentes ativos da fresa se encontram na superfície frontal da ferramenta, o eixo

da fresa fica perpendicular à superfície usinada. As fresas são chamadas de fresas frontais ou de topo.

Figura 9 - Fresamento frontal e fresamento tangencial. König e Klocke (1999)



FRESAMENTO NA MADEIRA

Segundo Gonçalves (2000), entre as operações mais importantes de usinagem estão o fresamento periférico e o corte ortogonal. Os movimentos relativos entre peça e ferramenta, no caso do fresamento periférico, são classificados em fresamento discordante e concordante, classificação também adotada na usinagem dos metais. Em todos os casos é importante o conhecimento da velocidade de corte, da velocidade de avanço, do ângulo de direção efetiva e do ângulo de direção de avanço, além das grandezas de percurso.

O processo de fresamento periférico também conhecido como processo de aplainamento para usinagem de madeira envolve a remoção de excesso de madeira da peça em forma de cavaco os quais são formados pelo contato intermitente da peça com uma ferramenta de uma ou mais facas que giram no porta ferramentas. O conjunto do cabeçote porta-ferramentas com as lâminas de corte, mais os suportes de fixação e quebra- cavacos, é de uso universal em máquinas de beneficiamento de madeira nos processos de aplainamento e fresamento nas mais diversas formas (rasgos, rebaixos,

chanfros, molduramentos de perfis, etc.). Atualmente utilizam-se ferramentas de um único corpo mono ou multicortantes, com pastilhas ou lâminas de corte fixas ou intercambiáveis. Para Silva (2002), o fresamento periférico, é um processo de usinagem destinado à obtenção de superfícies regradas, geradas por um movimento retilíneo alternativo da peça ou da ferramenta.

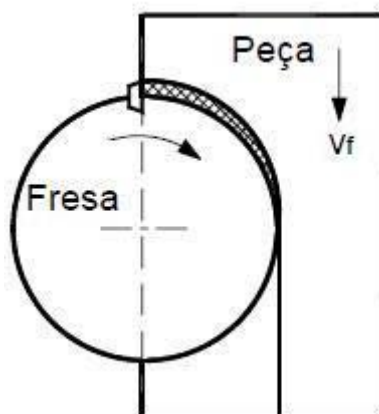
Para Bianchi (1996) o fresamento da madeira, na linguagem da indústria madeireira, trata de uma operação de aplainamento lateral ou de topo. O fresamento apresentará características diferentes conforme a orientação das fibras da madeira em relação ao movimento da ferramenta.

3.5.1 FRESAMENTO CONCORDANTE

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2006) :

- Fresamento Concordante = os movimentos de corte e de avanço tem, o mesmo sentido, iniciando-se o corte com a espessura máxima de cavaco, ou seja, a espessura do cavaco vai diminuindo desde o início do corte, conforme Figura 10.

Figura 10. Fresamento cilíndrico tangencial concordante. Stemmer (1995)



Segundo Sandvik (2005) o fresamento concordante ou “para baixo” (dow milling): o sentido de avanço da peça é o mesmo da rotação da fresa, a espessura do cavaco vai diminuindo desde o início do corte. Produz peças com melhor acabamento final.

O corte concordante se caracteriza pelo ângulo (φ) se iniciar com um valor máximo e decrescer até zero no fim do corte de uma aresta. No corte concordante o movimento de avanço da mesa apresenta o mesmo sentido que o movimento rotatório da ferramenta. Neste tipo de fresamento, a componente vertical de usinagem apresenta a mesma direção em todo o corte, ou seja, empurrando a peça em direção à mesa. Isto diminui vários inconvenientes em relação ao corte discordante. Existem ainda alguns inconvenientes neste tipo de usinagem. Como o início do corte se dá arrancando a máxima seção transversal de corte, muita força é dispensada no início do corte, fato que é altamente ampliado em usinagem de materiais duros, o que pode favorecer quebras e diminuição da vida da ferramenta. Outro problema advém do fato de que a força de avanço ocorre sempre no mesmo sentido do deslocamento. Como a força resultante sobre a fresa varia em módulo, a força resultante sobre o fuso variará em módulo e direção fazendo com que ocorram vibrações (DINIZ et al., 2001).

O fresamento concordante tem as seguintes vantagens:

- Vida mais longa da ferramenta (menor desgaste);
- Melhor acabamento superficial;
- Menor vibração;
- A força de corte força a peça contra a mesa (no fresamento discordante a força de corte tende a levantar a peça). Isto faz com que peças delgadas percam seu apoio na mesa ou vibrem.

O fresamento concordante tem as seguintes desvantagens:

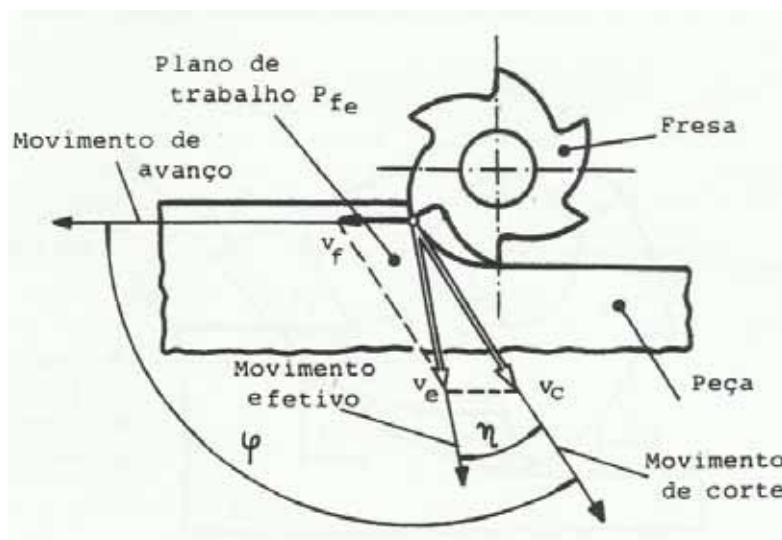
- Quando ocorre folga entre o fuso e a castanha de comando do avanço da mesa fresadora. Nos fresamento concordante a força de corte puxa a peça para baixo da fresa numa magnitude proporcional à folga, gerando um cavaco mais

espesso do que o predito para o avanço programado. Esta força de corte excessiva pode provocar quebra dos dentes ou insertos (pastilhas). No caso do fresamento discordante, as forças de corte se opõem à força de avanço, eliminando a folga em sistemas de avanço menos rígidos.

- O fresamento concordante não deve ser usado quando a superfície da peça tiver resíduos de areia, escamas ou grandes irregularidades. Nestes casos, o fresamento discordante é mais vantajoso, por permitir que a aresta de corte da fresa penetre abaixo desta camada superficial indesejável e evitar o seu efeito sobre a vida da fresa.

Gonçalves (2000) apresenta também a Figura 11, que demonstra o fresamento concordante e suas terminologias, segundo a Norma 6162/88, adotadas para usinagem de metais e utilizadas para usinagem de madeiras.

Figura 11 - Geometria do Fresamento Concordante. (Norma ABNT 6162/88 in Gonçalves, 2000).

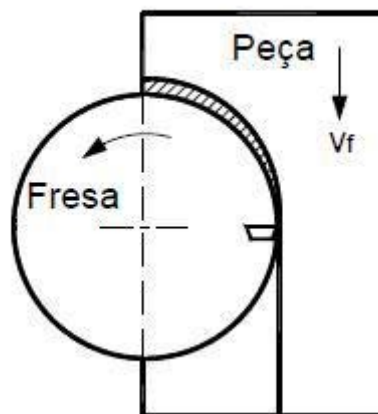


3.5.2 FRESAMENTO DISCORDANTE

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2006):

- Fresamento Discordante = os movimentos de corte e avanço tem, sentidos opostos, iniciando o corte com a espessura mínima de cavaco. A espessura do cavaco começa em zero e vai aumentando até o final do corte, conforme figura 12.

Figura 12. Fresamento cilíndrico tangencial discordante. Stemmer (1995)

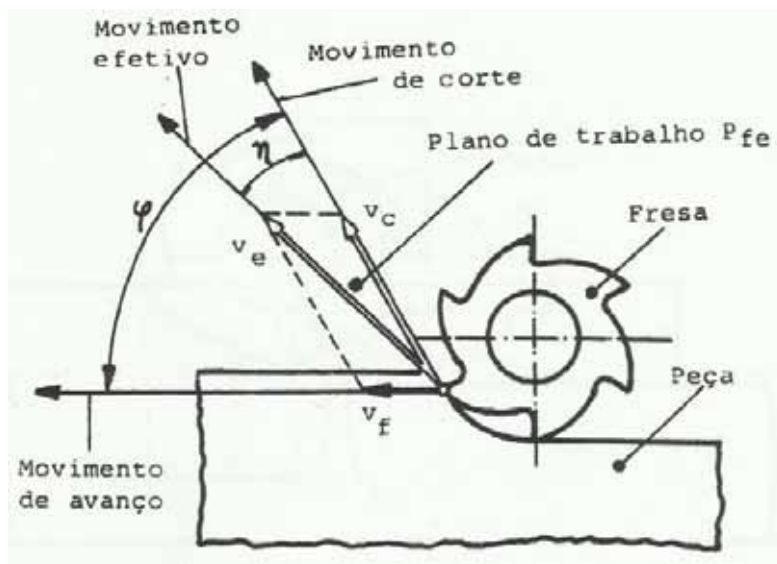


Segundo Sandvik (2005) o fresamento discordante ou convencional ("para cima-up milling".) o sentido de avanço da peça é oposto ao da rotação da fresa, sendo favorável na aplicação em máquinas com folga. É ainda o mais utilizado devido à menor periculosidade para o operador, e pior acabamento superficial devido às vibrações. Para Diniz *et al* (2001) a espessura do cavaco começa em zero e vai aumentando até o final do corte. O corte discordante se caracteriza pelo ângulo de direção de avanço (ϕ) iniciar-se com o valor zero e chegar a um valor máximo no fim do passe da aresta de corte. A espessura de corte aumenta progressivamente de zero até um valor máximo. No início do corte, quando a ferramenta toca a peça, essa é forçada para dentro da peça, gerando atrito, o que faz com que haja deformação plástica neste local ao invés da formação de cavaco propriamente dita, e altas temperaturas. Por ser um corte intermitente, a aresta de corte pode encontrar nessa região uma

superfície encruada pelo passe da aresta anterior, o que favorece bastante o aumento do desgaste da ferramenta. Vencidos estes empecilhos, o corte começa a retirar material da peça e no começo desta operação, a componente vertical da força de usinagem tende a afastar a ferramenta da peça e empurra a peça contra a mesa da máquina, enquanto que no final da operação de um dente, a aresta tende a retirar a peça da mesa.

Gonçalves (2000) apresenta na Figura 13 o fresamento discordante e suas terminologias, segundo a Norma 6162/88, adotadas para usinagem de metais e utilizadas para usinagem de madeiras.

Figura 13 - Geometria do Fresamento Discordante. (Norma ABNT 6162/88 - Gonçalves, 2000).



Gonçalves (2000) por fim, apresentam nas Figuras 14 e 15, os movimentos no processo de fresamento periférico segundo a Norma 6162/88.

Figura 14 - Percurso de corte (l_c), percurso de avanço (l_f) e percurso efetivo (l_e); profundidade de corte (a_e), no fresamento discordante (Norma ABNT 6162/88 in Gonçalves, 2000).

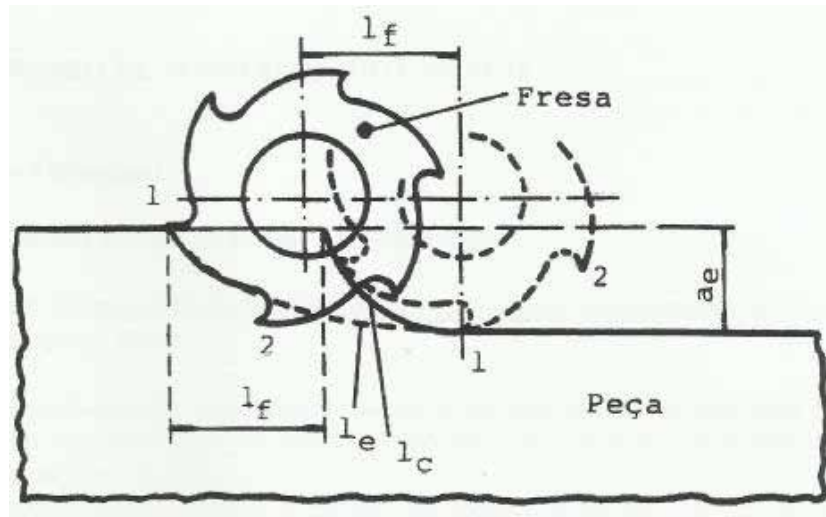
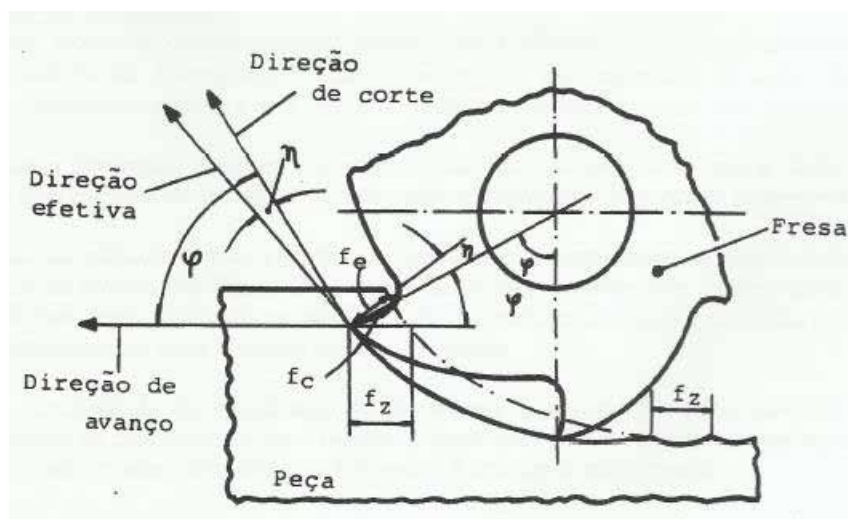


Figura 15 - Avanço por dente (f_z), avanço de corte (f_c) e avanço efetivo (f_e) no fresamento discordante (Norma ABNT 6162/88 in Gonçalves, 2000).



η = Ângulo de direção efetiva.

φ = Ângulo de direção de avanço.

3.5.3 FRESAS

Segundo Gonçalves (2000) a fresa é uma ferramenta cilíndrica provida de dentes cortantes paralelos à superfície a ser usinada. Através do movimento combinado entre a rotação da ferramenta e o deslocamento da peça, é possível produzir uma superfície plana ou com forma determinada.

As fresas são divididas em basicamente quatro grupos principais segundo Stemmer (1992):

- **Fresas cilíndricas ou periféricas:** Cortam na periferia cilíndrica, gerando superfícies planas paralelas ao eixo da ferramenta. Conforme as figuras 16, 17, 18 e 19.
- **Fresas angulares:** Possuem dois gumes principais, formando um ângulo entre si, conforme as figuras 20 e 21.
- **Fresas de haste, cilíndrico-frontais:** Chamadas de fresas de topo, usadas para facear, ranhurar, executar bolsões, rebaixos, gravações, rasgos de todo o tipo e tamanho, fresar contornos, etc. Conforme as figuras 22, 23, 24 e 25. Cortam tanto na periferia como na parte frontal;
- **Fresas de perfil constante ou detalonadas:** apresentam um ângulo de incidência constante, obtido pelo detalonado, em torno ou retífica, dando forma espiral ao traço do plano de incidência. São usadas para produzir formas complexas Como mostrado na Figura 26.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2006) esses diversos tipos de fresas são fabricadas principalmente de aço rápido, aço rápido com cobertura e metal duro. Fresas de diâmetros grandes como as fresas frontais de facear ou as fresas cilíndricas de disco, são feitas de metal duro com corpo de aço carbono. Para essas fresas, devido ao grande diâmetro, não é necessário ter rotações altas para se conseguir as velocidades de corte compatíveis com o metal duro e com o metal duro com cobertura. Assim, no corpo da fresa se utiliza material barato (aço carbono), deixando o metal duro (que é bem mais caro) para a região que realmente vai realizar o corte. Para fresas de diâmetros pequenos, como fresas de topo, normalmente o material utilizado é o aço

rápido e o aço rápido com cobertura, pois para se conseguir velocidades altas compatíveis com o metal duro com essas fresas, a máquina utilizada precisa fornecer altíssimas rotações. Atualmente, porém, dado ao fato de que os modernos centros de usinagem possibilitam rotações cada vez mais altas, as fresas inteiriças de metal duro também tem sido uma opção para fresas de pequeno diâmetro.

- **Fresas cilíndricas ou esféricas:**

Figura 16 - Fresa de dente reto. Stemmer (1992)



Figura 17 - Fresa helicoidal. Stemmer (1992)



Figura 18 - Fresa de disco de dentes retos, de 3 cortes. Stemmer (1992).

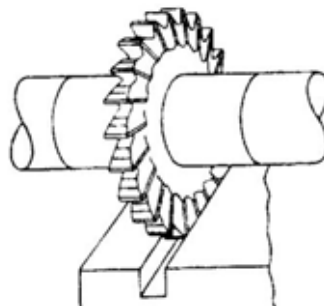


Figura 19: Fresa cilíndrica de disco de dentes cruzados. Stemmer (1992).



- **Fresas angulares:**

Figura 20: Fresas frontais angulares. Stemmer (1992).

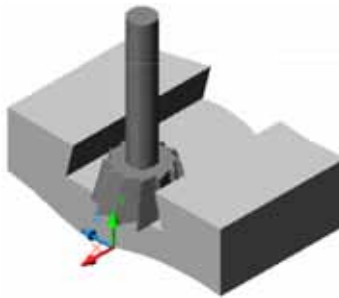
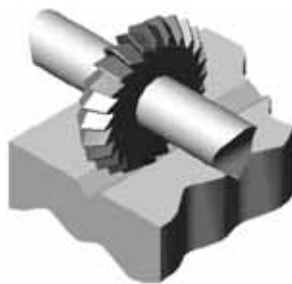


Figura 21 - Fresa prismática. Stemmer (1992)



- **Fresas de haste, cilíndrico-frontais:**

Figura 22 - Fresa de topo de haste cilíndrica. Stemmer (1992).



Figura 23 - Fresa de topo para “ranhurar” de haste cilíndrica. Stemmer (1992).



Figura 24 - Fresa cilindro frontal postiça. Stemmer (1992)

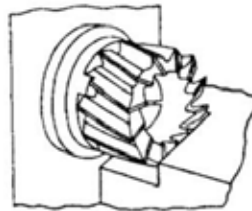
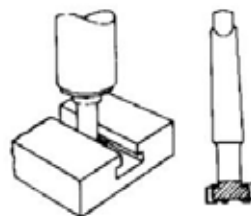
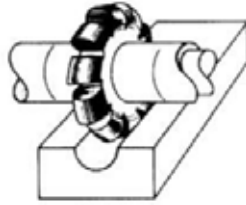


Figura 25 - Fresa de haste para ranhuras T. Stemmer (1992).



- **Fresas de perfil constante ou detalonadas:**

Figura 26 - Fresa de talonada semicircular convexa. Stemmer (1992)



3.6 ACABAMENTO SUPERFICIAL

As superfícies das peças, quando observadas de perto, em detalhes mostram que apresentam, sempre após um tipo de usinagem, irregularidades. Estas por si causam imperfeições ou marcas deixadas pela ferramenta de corte que atuam sobre tal superfície da peça. Partindo disso vê-se a importância do estudo do acabamento superficial na medida da necessidade de precisão, que aumenta com a funcionalidade das peças. (PALMA, 2006)

A indústria vem dando grande importância ao acabamento superficial e precisão dimensional das peças usinadas. Portanto, medir e caracterizar o acabamento das superfícies torna-se um diferencial no processo de usinagem. (REDDY E RAO, 2005)

Segundo Amorim (2002) a rugosidade consiste em uma soma de irregularidades, com espaçamento regular ou irregular, que tendem a formar um padrão ou textura característicos em uma superfície. Estas por si estão presentes em todas as superfícies reais, por mais perfeitas que estas sejam, pois partem de um tipo de herança do método empregado na obtenção de superfície (torneamento, fresamento, furação).

Em geral, o perfil de rugosidade é afetado por diversas variáveis e pode ser avaliado por meio de diversos parâmetros, que podem ser classificados em:

- Parâmetros de amplitude: determinados por alturas dos picos, profundidades dos vales ou pelos dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades;
- Parâmetros de espaço: determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície.
- Parâmetros híbridos: determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e de espaço.

Os perfis são caracterizados principalmente por parâmetros de amplitude, expressos em micrometros (μm). Dentre estes parâmetros, os mais utilizados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de amplitude mais comuns em perfis de rugosidade.

Definição	Equação Característica	Esquema Representativo
Média aritmética dos valores absolutos de amplitudes em um perfil de rugosidades	$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L y dx$ Rugosidade média (R_a)	Rugosidade Média, R_a Linha central Comprimento de amostragem de rugosidade
Média quadrática das amplitudes em um perfil de rugosidades	$Rq = \sqrt{\frac{(y_1 - \bar{y}_m)^2 + (y_2 - \bar{y}_m)^2 + \dots + (y_N - \bar{y}_m)^2}{N}}$ Rugosidade média quadrática (R_q)	$N = \frac{\text{Cutoff } L}{\Delta x}$ Cutoff L Linha média $\bar{y}_m$ $y_1, y_2, \dots, y_N$
Distância entre o extremo superior e inferior do perfil, também conhecido por R_{max}	---	R_y L
Média de sucessivos valores de R_y	$Rz = \frac{(R_1 + R_3 + \dots + R_9) + (R_2 + R_4 + \dots + R_{10})}{5}$ Média da altura máxima de perfil (R_z)	$R_1, R_2, \dots, R_{10}$ L

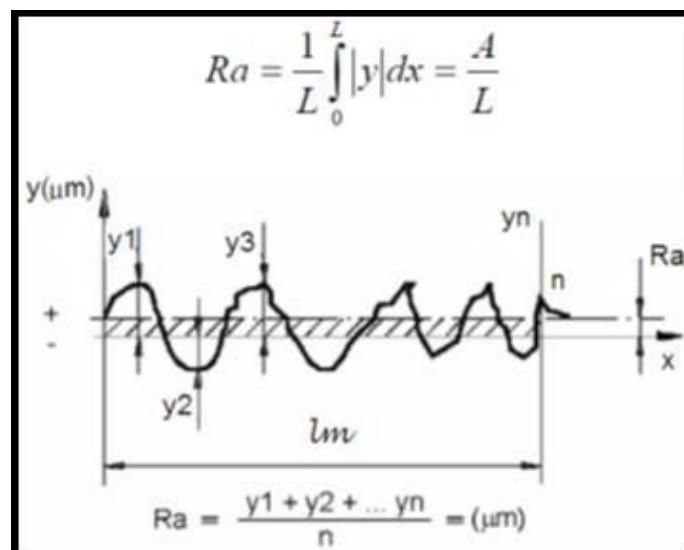
Fonte: Modificado de Field, Kahles e Koster (1999).

- Rugosidade média aritmética (R_a): é o parâmetro mais utilizado no meio acadêmico e industrial, porém como representa um valor médio, ele pode indicar valores próximos para superfícies geometricamente diferentes. Baseia-se nas medidas de profundidade da rugosidade. O R_a é a média aritmética dos

valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo em relação à linha média num comprimento de amostragem. (AGOSTINHO et al, 1977). É o parâmetro mais utilizado de uma forma geral e quando for necessário o controle contínuo da rugosidade em linhas de produção. Também na avaliação de superfícies em que o acabamento apresenta sulcos de usinagem bem orientados como no torneamento e no fresamento e em superfícies de pouca responsabilidade, como no caso de acabamentos com fins apenas estéticos.

A norma ABNT ISO 4287 (2002), descreve os parâmetros de amplitude para a medição de rugosidade. Neste trabalho deu-se ênfase no parâmetro de Rugosidade Média (Ra) do rugosímetro. A rugosidade aritmética ou média (Ra) é dada em unidades de micrômetro (μm) ou micro polegada. Ele é determinado em função da linha média do perfil de rugosidade, como mostrado na Figura 27.

Figura 27. Rugosidade média e perfil de rugosidade (ISO 4287, 2002).



3.7 MÁQUINAS CNC

Segundo Gonçalves (2004) o Comando Numérico Computadorizado (CNC) é hoje o mais dinâmico processo de fabricação, constituindo um dos maiores desenvolvimentos para a automatização de máquinas operatrizes de usinagem, além de outras aplicações possíveis fora da indústria metalúrgica.

Analisando comparativamente, o CNC representa um investimento inicial maior, porém quando bem estruturada sua aplicação, isto se compensa, devido às vantagens inerentes ao processo, que diminui sensivelmente o tempo de fabricação, material em processamento, espaço total útil, além de contribuir para a racionalização do trabalho e qualidade de serviço.

Como definição, pode-se dizer que o Comando Numérico é um equipamento eletrônico, capaz de receber informações através de entrada de dados própria, compilar estas informações e transmiti-las em forma de comando à máquina operatriz de modo que esta, sem a intervenção do operador, realize as operações na sequência programada.

Para entender o princípio básico de funcionamento de uma máquina-ferramenta a Comando Numérico, deve-se dividi-la em três partes:

- **Programação:** numa primeira divisão simplista, podemos dizer que a programação envolve o desenho da peça, o planejamento de usinagem e a máquina-ferramenta a ser utilizada.
- **Comando numérico:** o Comando Numérico é composto de uma unidade de recepção de informações que pode ser digitais, magnéticos ou alimentação direta de uma central de computação. Uma unidade calculadora, onde as informações são processadas e transmitidas às unidades de movimento (motores de passo).

O circuito que integra a máquina-ferramenta ao Comando Numérico é denominado de interface, o qual é projetado de acordo com as características mecânicas da máquina.

- **Máquina-ferramenta:** o projeto da máquina-ferramenta deverá objetivar os recursos operacionais oferecidos pelo Comando Numérico. Quanto mais recursos oferecer, maior versatilidade ela terá.

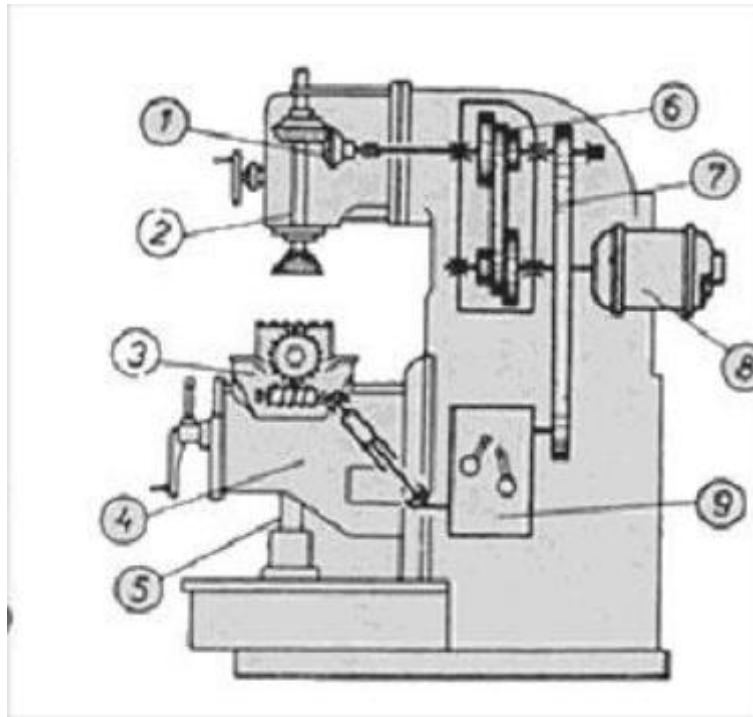
Principais funções das máquinas CNC: furações verticais, furações horizontais, fresagens verticais, perfurações, fresagens inclinadas e cortes.

Slack *et al.* (1996) diz que a máquina CNC é composta basicamente da unidade de comando, onde são processados todos os cálculos e o software do processo do sistema, a máquina ferramenta e o acionamento dos movimentos dos eixos. Para o funcionamento desejado da máquina é necessário um comunicação feita através de códigos ou símbolos padrão, onde esses são chamados de linguagem de programação.

3.7.1 Fresadora CNC

Segundo Almeida (2013) a Fresadora junto com o torno é capaz de transformar o material de qualquer peça, com alguma complexidade geométrica. Conforme a Figura 28, uma fresadora é basicamente composta por um motor de alta velocidade, um mandril e uma ferramenta de corte encaixada no mandril. A rotação do motor gera um movimento rotacional na ferramenta de corte, também chamada de fresa, que retira material de um tarugo. O material bruto é deslocado linearmente quando fixado a uma mesa base. A combinação da rotação da fresa e o movimento linear da mesa resulta na subtração de material do tarugo. (LYRA ,2010)

Figura 28. Elementos de máquina da Fresadora (COSTA 2006).



Segundo Almeida (2013) os principais elementos mecânicos de uma fresadora convencional são mostrados e descritos abaixo:

1. Representa o ataque do eixo principal por engrenagens cônicas.
2. Eixo principal, no qual se fixa o mandril e a fresa.
3. Mecanismo de avanço da mesa.
4. Mísula.
5. Fuso de translação da mesa.
6. Cone de roldanas.
7. Corrente de transmissão para os avanços.
8. Motor.
9. Caixa de câmbio para avanços.

Lyra (2010) complementa afirmando que o controle dos movimentos lineares por meio da eletrônica e da computação, pode-se automatizar uma fresadora convencional e aplicar os conceitos de Comando Numérico Computadorizado. Se uma fresadora tem seu controle por meio do Comando Numérico Computadorizado, a máquina tem o nome de Fresadora CNC.

A máquina utilizada neste presente trabalho foi a Furadeira - Fresadora - CNC Tech Z1.

3.7.2 A Máquina Furadeira - Fresadora CNC Tech Z1.

3.7.2.1 Descrição da máquina

Segundo Almeida (2013) a máquina Furadeira - Fresadora CNC Tech Z1 (Figura 29), segundo a empresa SCM GROUP S.P. A (2011) é uma máquina com controle numérico (CN) que trabalha unicamente com madeira ou materiais com os mesmos atributos, sendo esses atributos físicos, como por exemplo, o compensado. A estrutura desta máquina é basicamente constituída por dois elementos principais:

- A base portante A (Figura 30);
- O montante monobloco B que translada ao longo do eixo X (Figura 30).

O grupo operador C é composto por uma cabeça de perfuração onde é possível montar-se diversos outros grupos operadores, como por exemplo, eletromandris, fresas de disco, etc. Ele está disposto sobre uma prancha D que se movimenta sobre o montante móvel B ao longo do eixo Y e que engloba movimentos ao longo do eixo Z. Na Figura 31 é mostrado as direções dos eixos X, Y e Z da máquina.

Os planos de trabalho são compostos por barras de liga de alumínio de extrusão montadas em suportes que possuem uma guia de esferas recirculantes e dispositivos de bloqueio pneumático (SCM GROUP S.P.A, 2011, Chap. 1, Pag. 16-32).

Dentro dos planos de trabalho existe a movimentação dos planos ao longo do eixo X sobre barras de aço redondas e retificadas. Neles estão instalados dispositivos com ventosa F (Figura 32) para a fixação das peças.

Estes dispositivos são posicionados e correm sobre o plano ao longo do eixo Y. SCM GROUP S.P.A (2011).

A máquina também possui uma unidade de controle que se situa em um armário elétrico G e um painel de controle móvel G1 (Figura 33) integrados a uma luva com um comprimento suficiente para qualquer disponibilidade (sempre respeitando das distâncias mínimas do manual da máquina) SCM GROUP S.P. A (2011).

Todos os movimentos ocorrem com deslizamento sobre guias prismáticas com patins de recirculação esferas; os movimentos são realizados através de fusos de esferas recirculantes de altíssima qualidade. Sobre a base estão instalados os planos de trabalho E, e os dispositivos de referência por batente para o posicionamento das peças (SCM GROUP S.P.A, 2011, Chap. 1, Pag. 16-32).

Figura 29 - A máquina Furadeira - Fresadora CNC Tech Z1 (Catálogo TECH Z1 2011).



Figura 30 - Esquema da estrutura da máquina (Catálogo TECH Z1 2011- adaptado)

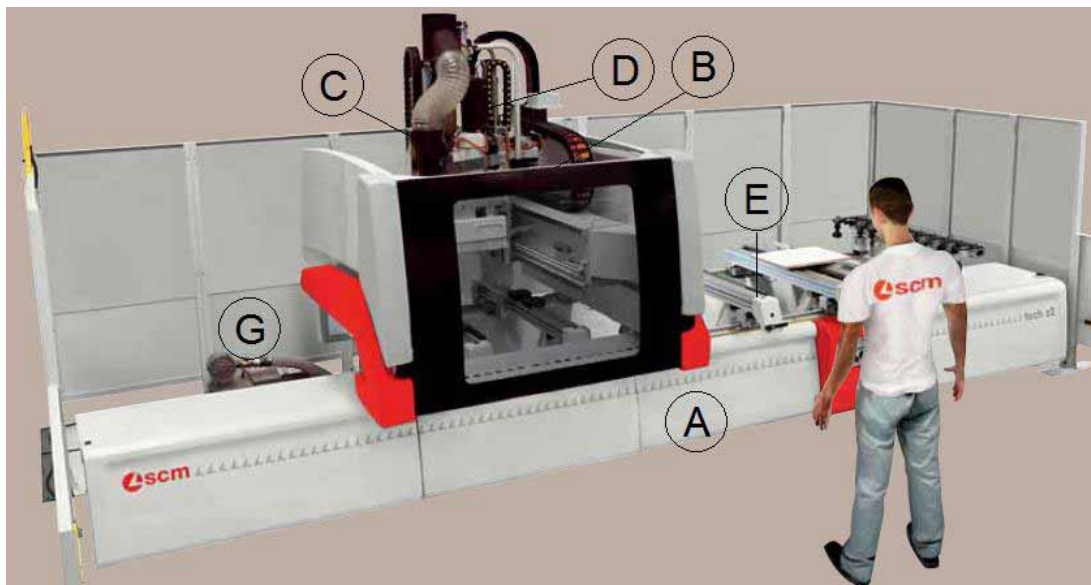


Figura 31 - Plano de eixos utilizado pelo equipamento (Catálogo TECH Z1 2011- adaptado).

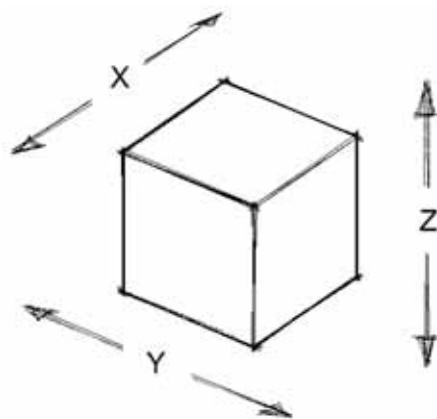


Figura 32 - Dispositivo com ventosa para a fixação das peças (Catálogo TECH Z1 2011-adaptado)

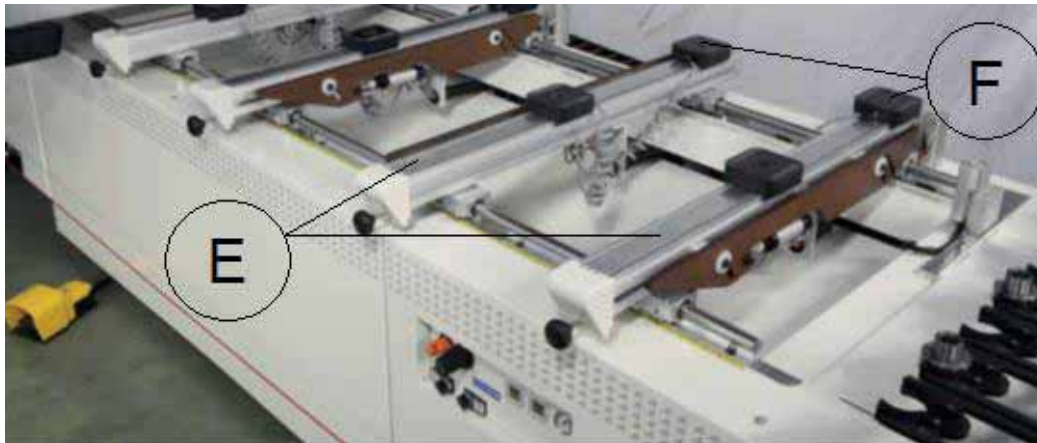


Figura 33 - Armário elétrico G e painel de controle móvel G1 (Catálogo TECH Z1 2011-adaptado).



3.7.2.2 Descrição dos grupos operadores

Segundo Almeida (2013) a máquina pode ser equipada com as seguintes unidades operadoras:

- Uma unidade de perfuração a 8 mandris verticais (cinco em sentido “X”), (três em sentido “Y”) (Figura 34);
- 2+2 mandris horizontais em sentido “X”;
- 1+1 mandris horizontais em sentido “Y”;

- Unidade serra integrada
- Fresa vertical de 6,6 (S1) / 7,5 (S2)kW (9/10Hp);
- Dispositivo lateral de 10 posições – HSK 63 (Figura 35).

Figura 34. (a) Unidade de operação e (b) Mandril (Catálogo TECH Z1 2011- adaptado).



Figura 35. Dispositivo lateral de 10 posições (Catálogo TECH Z1 - adaptado).



3.8 A MADEIRA DE *EUCALYPTUS GRANDIS*

Segundo Lopes (2007) o gênero *Eucalyptus* pertence à família Myrtaceae, da classe das angiospermas dicotiledôneas, contando com cerca de 670 espécies, a maior parte originária da Austrália. (ABRAF, 2007)

Sua introdução ocorreu no Brasil no início do século XIX, com as primeiras árvores plantadas no Jardim Botânico do Rio de Janeiro, com função decorativa. Apesar do significativo número de espécies, as plantações são restritas a somente algumas como o *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla*, *E. saligna*, *E.camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. globulus*, *E. viminalis*, *E. deglupta*, *E.citriodora*, *E. exserta*, *E. paniculata* e *E. robusta*. No Brasil, as espécies mais plantadas são o *E. grandis* (55%), *E. saligna* (17%), *E. urophylla* (9%), *E. viminalis* (2%), híbridos de *E.grandis* x *E. urophylla* (11%) e outras espécies (6%). (ABRAF, 2007).

O *Eucalyptus grandis* ocorre naturalmente no norte do estado de New South Wales e na região central e norte de Queensland- Austrália, do nível do mar até 1100 m de altitude, com 1000-1800 mm/ano de precipitação no verão. A temperatura máxima média varia entre 24-30 °C e a mínima média varia de 3-8 °C. (HILLS E BROWN,1984) .A opção pelo *Eucalyptus grandis* no Brasil está relacionada à sua excelente resposta silvicultural com boa forma e rápido crescimento, além de propriedades da madeira desejáveis para usos múltiplos, como a massa específica média, grã direita, fácil usinagem, boa aceitação de acabamento e cor levemente avermelhada. (TOMASELLI, 2000)

Silva (2002) estudando a madeira de eucaliptos destacou a do *E. grandis* pela qualidade nos seguintes processos finais de serraria: aplainamento, tingimento, colagem e união com pregos e parafusos.

Simula e Tissari (1998) estudando a madeira de eucaliptos concluíram que a do *E. grandis* é a mais indicada na manufatura de móveis e objetos devido a fácil trabalhabilidade e bom desempenho na colagem.

Atualmente, o *E. grandis* vem sendo cultivado intensivamente no Brasil com o objetivo principal de atender às demandas do setor de celulose e papel, chapas duras, painéis aglomerados, e o setor de carvão vegetal para uso siderúrgico e metalúrgico. (SILVA, 2002).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item, são apresentados os materiais, métodos e os procedimentos de usinagem realizados no Laboratório de Usinagem e Automação – LUA, no Campus de Itapeva relativos a esta pesquisa.

4.1 AS PEÇAS DE MADEIRA

Para esse trabalho foram utilizados painéis de sarrafos de madeira de *Eucalyptus grandis* (Figura 36), visando o melhor aproveitamento da madeira existente no laboratório de usinagem. Os painéis tinham as dimensões iniciais de 600 x 600x 22,5 mm e serviram de base para a usinagem dos corpos de prova.

Figura 36 - Pannel de sarrafos de madeira de *Eucalyptus grandis*.



Esses painéis receberam usinagem por fresamento tangencial concordante e discordante numa mesma peça em lados opostos. Foram ainda realizados fresamento frontal com avanço paralelo às fibras da madeira e fresamento frontal com avanço perpendicular às fibras. Para cada

procedimento foram gerados seis trechos de medidas iguais (seis repetições) em ambos os lados (Figura 37a e Figura 37b), totalizando 7 chapas usinadas.

Figura 37a – Dados da usinagem dos painéis de sarrafos de madeira de *Eucalyptus grandis*.

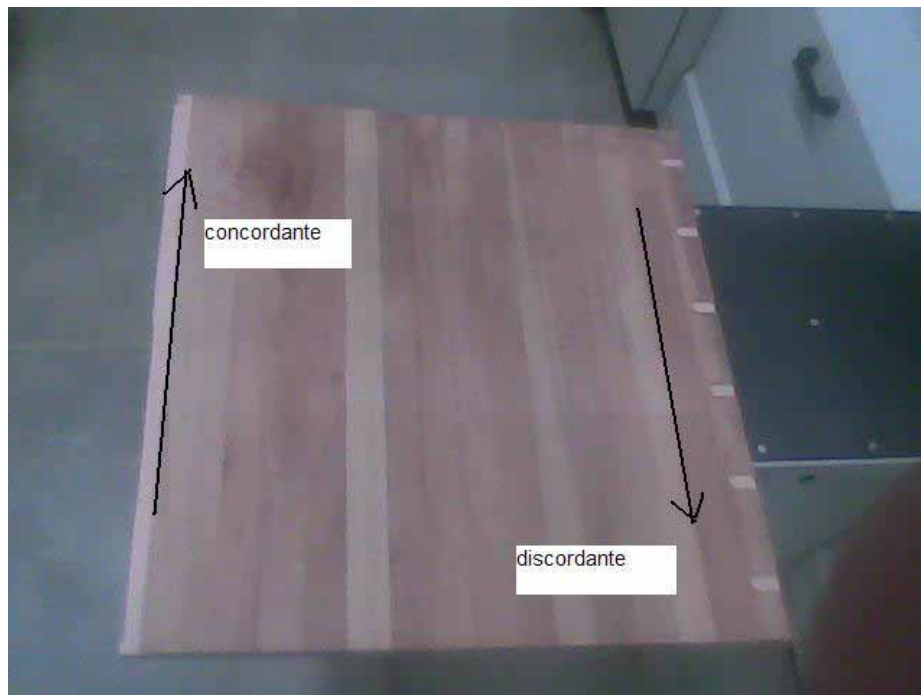
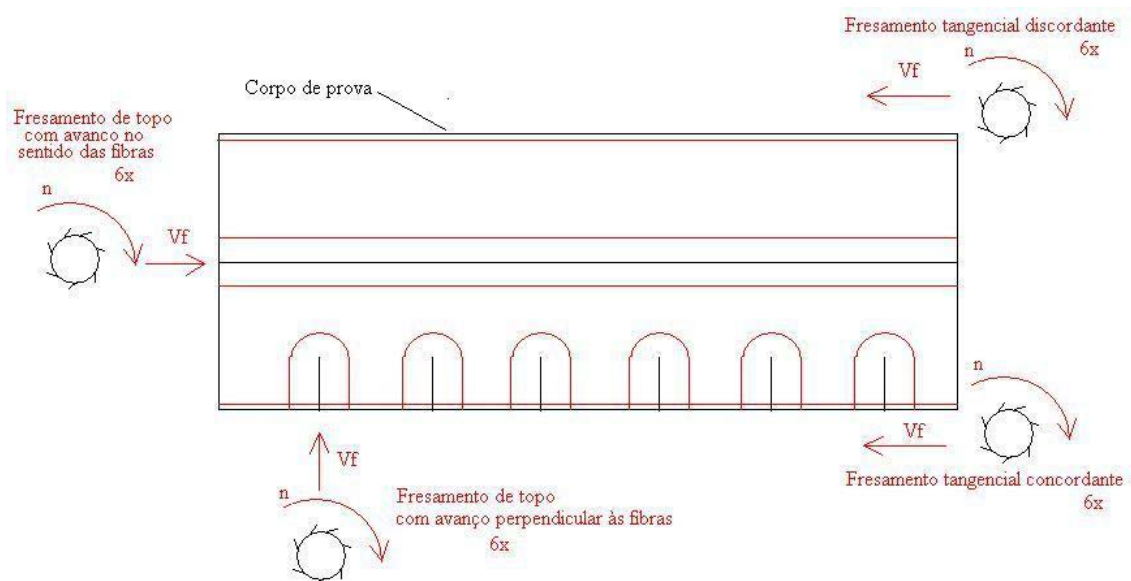


Figura 37b – Dados da usinagem dos painéis de sarrafos de madeira de *Eucalyptus grandis*.



Das sete chapas usinadas extraiu-se seis corpos de prova com dimensões de 97 x 32 x 23 mm (Figuras 38 e 39) para cada situação. Com isso obteve-se 84 corpos de prova para as respectivas análises.

Figura 38 – Corpo de prova do fresamento frontal

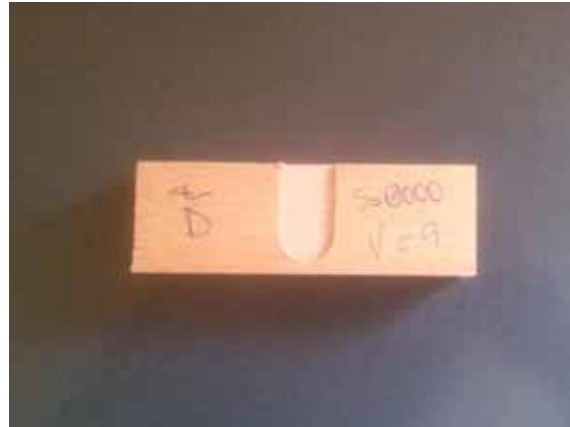


Figura 39 - Corpo de prova do fresamento tangencial



Foi calculado a densidade básica (g/cm^3) segundo Vital (1984) e a densidade aparente 12% de umidade segundo Rezende *et al.* (1988) os resultados são encontrados nos resultados e discussões.

4.2 CÁLCULO DA VELOCIDADE DE CORTE (V_c)

Um dos objetivos desse trabalho foi analisar a influência da velocidade de corte no acabamento de peças de *Eucalyptus grandis* fresadas. Para isso foram estabelecidas 4 rotações (n) do cabeçote fresador (spindle).

Com as rotações utilizadas das ferramentas foi possível calcular as velocidades de corte (V_c) para as respectivas variações nos ensaios. A velocidade de corte é dada pela Equação (1).

As rotações utilizadas nos ensaios foram de $n = 7000, 10000, 13000$ e 16000 rpm, para a ferramenta de fresa de topo com dentes helicoidais de acabamento no diâmetro de 16 mm, ou seja, para essas rotações e esse diâmetro obteve-se os valores de Velocidade de Corte (V_c) respectivamente de 5,9; 8,4; 10,9 e 13,4 m/s. Para a análise do efeito da velocidade de corte no acabamento de peças de *eucalyptus grandis* foi fixada uma velocidade de avanço (V_f) de 5 m/min em todos os ensaios.

4.2.1 Velocidade de Avanço (V_f).

Neste trabalho também se buscou analisar a influência da velocidade de avanço no acabamento de peças de *Eucalyptus grandis* fresadas. Para isso foram estabelecidas 4 velocidades de avanço. Foram utilizadas as velocidades de 3; 5; 7 e 9 m/min em $a_p = 1$ mm.

Para a análise do efeito da velocidade de avanço no acabamento de peças de *Eucalyptus grandis* foi fixada uma rotação de $n = 13000$ RPM, ou $V_c = 10,9$ m/s em todos os ensaios.

4.3 MÁQUINAS UTILIZADAS

4.3.1 Serra Seccionadora

Para a preparação dos painéis pré-corpos de prova foi utilizada uma serra seccionadora TECMATIC, modelo FIT 2.9 (Figura 40), onde foram preparados os corpos de prova de *Eucalyptus grandis*.

Figura 40 - Serra seccionadora TECMATIC – marca e modelo (ALMEIDA, 2013).



4.3.2 Furadeira - Fresadora CNC Tech Z1.

Para a obtenção das superfícies fresadas analisadas neste trabalho foi utilizada a máquina Furadeira – Fresadora CNC Tech Z1 (Figura 41), onde foi realizado o processo de usinagem de fresamento periférico (tangencial) e de topo (frontal) da madeira de *Eucalyptus grandis*.

Figura 41 - Furadeira – Fresadora CNC Tech Z1 (SCM GROUP S. P. A. – Manual de Instruções; ALMEIDA, 2013)



Os dados técnicos da máquina são apresentados na Figura 42 a seguir:

Figura 42 - Dados Técnicos Gerais (SCM GROUP S.P.A – Manual de Instruções, 2011).

DADOS TÉCNICOS GERAIS		
Plano de trabalho útil com 1 panel (Tech Z1 - 26)	mm	2550x1050
Plano de trabalho útil com 1 panel (Tech Z1 - 30)	mm	3050x1050
Curso eixo "X" - "Y"	mm	ver o cap. 3.4
Curso eixo Z	mm	150
Velocidade programável no eixo "X"	m/min	25
Velocidade programável no eixo "Y"	m/min	45
Velocidade programável no eixo "Z"	m/min	15
Velocidade vetorial	m/min	54
Passagem painel	mm	ver o cap. 3.5
Peso compreendido aparelhagem elétrica (Tech Z1 - 26/30)	kg	1900/2200
Potência acústica segundo normas ISO / EN	DB	ver o cap. 3.2
⁽¹⁾ Opcional		
DADOS TÉCNICOS ELÉCTRICOS		
Potência motor pontas a perfurar a 12 / 18 mandrils verticais	kW (Hp)	2,2 (3)
Potência Eletromandril y/o grupos operadores opcionais	kW (Hp)	ver o cap. específico
Alimentação elétrica standard	V / Hz	400 / 50-60
Corrente nominal em Ampere	A	27 ⁽²⁾ + 44 ⁽³⁾
DADOS TÉCNICOS alimentação ar comprimido e aspiração aparas		
Alimentação ar comprimido	Bar	6,5
Consumo médio de ar comprimido	NI/min	400
Consumo maximo istântaneo ar comprimido	NI/min	700
Diâmetro condutor centralizado de aspiração aparas	mm	200
Consumo ar de aspiração	m³/h	3400
Velocidade ar de aspiração	m/sec	30
Depressão	Pascal	3000

4.3.2.1 Programas utilizados (CNC)

O software utilizado pela máquina CNC do Laboratório de Usinagem e Automação foi o Xilog Plus (Figura 43). Segundo a empresa GROUP S.P.A – Manual de Instruções (2011) a aplicação dele caracteriza-se pela configuração da máquina com as ferramentas através do painel de controle, importação dos arquivos dxf e xtl, programação paramétrica e a interpolação linear e circular dos planos x, y e z .

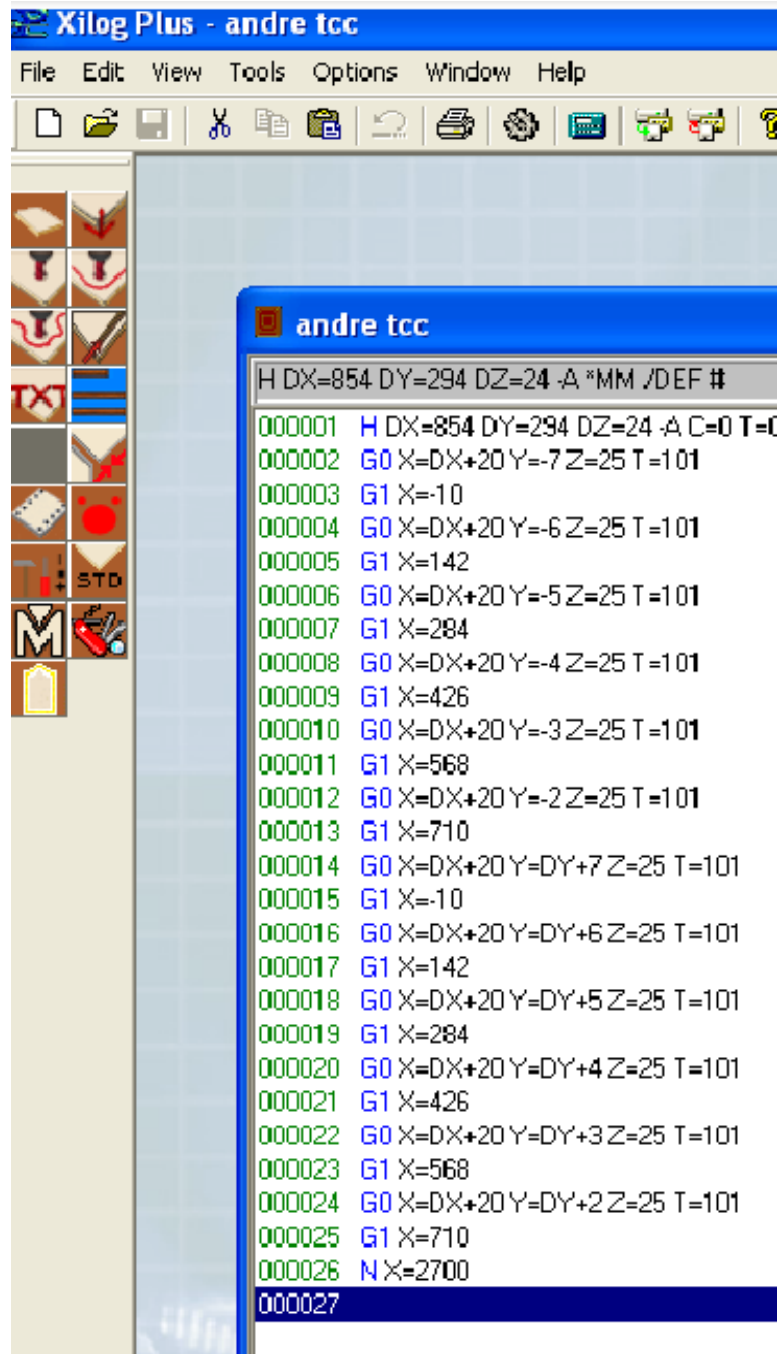
The screenshot displays the Yaskawa Robot Editor software window. The main area shows a list of tools under the "Fixed Tools" section, ranging from Tool 1 (HOLE TIP) to Tool 62 (DISC). Below this, there's a section for "External Tools" which includes a graphic of a red circle with a white arrow pointing to it, labeled "R.P.M MAX".

To the right, a table lists various parameters for the selected tool:

List parameters	Value
Type (0: HOLE TIP, 1: P.F.F.D., 2: M.N.T.)	0
Tip Length	+63.00
Tip Diameter	+20.00
Working Length	+30.00
Working Diameter	+20.00
Type for Balance Point Calculation (see Manual page 1)	
Height correction rate (When Delta type robot)	+0.00
Wear coefficient in length	+0.00
Wear coefficient in diameter	+0.00
Max wear in length	+0.00
Max wear in diameter	+0.00
Correct Length	+0.00
Correct Diameter	+20.00
Max. speed at < 100 mm radius reference in mm/min	+1.00
Standard speed at < 100 mm radius reference in mm/min	+1.00
Max Fluctuation	+4000.00
Rotation standard speed	+4000.00
Direction of rotation (revs./min)	-
Speed (G/M) at < 100 mm radius reference in mm/min	+3.00
Unbalanced load charge coefficient (MAG. TOL) (%)	1
Tool Counter position in X (%)	1
Tool Counter position in Y (%)	1

A configuração dos Comandos Numéricos utilizados no processo é gerada a partir do próprio software Xilog Plus da máquina. Esse programa gerado envia os parâmetros para que a máquina entenda a linguagem CNC e proceda a usinagem escolhida. A Figura 44 mostra o programa base para todos os ensaios desse trabalho.

Figura 44 - Programa de Comando Numérico de base para os ensaios. (ALMEIDA, 2013)



Onde:

Os números em verde indicam a sequência dos comandos a serem executados;

H – Dimensões da peça base;

G0 – Avanço rápido;

G1 – Ciclo retilíneo de usinagem;

X é a posição do cabeçote móvel no eixo X;

Y é a posição do cabeçote móvel no eixo Y;

Z é a posição do cabeçote móvel no eixo Z;

4.4 FERRAMENTA UTILIZADA

A fresa utilizada foi a Fresa de acabamento HWM – Premium - Upcut Spiral Bit, D = 16 x 35 x 90 mm, S = 16 mm, do fabricante CMT – código nº 193.161.11 (Figura 45).

Características técnicas:

- Ótimo acabamento da superfície de trabalho;
- Excelente acabamento na parte de baixo da placa;
- Evacuação de cavacos para cima.

Figura 45. Fresa de acabamento (Fabricante: CMT)



4.5 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

Para a medição da rugosidade foi utilizado um rugosímetro da marca TAYLOR HOBSON, modelo SURTRONIC 25+ com haste de medição com ponta de diamante (Figuras 46, 47 e 48).

O parâmetro para a avaliação do acabamento superficial das peças usinadas foi o de rugosidade Ra (média). Os parâmetros utilizados foram: *Cut-off* de 2,5 mm, Comprimento de medição de 12,5 mm, Filtro Gaussiano robusto e Range (resolução) de 300 μm .

Figura 46 - Rugosímetro Modelo SURTRONIC 25+; marca TAYLOR HOBSON.(ALMEIDA, 2013)



Foi então feito a medição da rugosidade nos sentidos a favor e contra o sentido do corte para o corte discordante e concordante e também no sentido frontal perpendicular e frontal paralelo às fibras.

Figura 47. Haste de medição.



Figura 48 - Ponta apalpadora cone-esférico de diamante



4.6 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Inicialmente tinha-se as peças de sarrafos de madeira de *Eucalyptus grandis* (Figura 49) das seguintes dimensões de 600 x 600 x 22,5 mm.

Figura 49. Painéis de sarrafos de madeira de *Eucalyptus grandis*.



Escolhidas as peças, foi necessário arranjar as peças para que fossem realizados os comandos numéricos para a máquina CNC fresar os corpos de prova.

Escolheu-se o método de dividir essas peças retangulares em seis medidas iguais para que a máquina realizasse os seis ensaios de fresamento periférico no sentido concordante e discordante em uma única peça, dando agilidade ao processo e averiguação de uma técnica mais precisa e eficiente.

A partir disso, foi possível criar os comandos numéricos computadorizados através do sentido de fresamento e os parâmetros do processo (Figura 50).

Figura 50 - Parâmetros adotados no software Xilog Plus.

The screenshot shows the Xilong Plus DEF software interface. On the left, there is a tree view of parameters under 'DEF'. The main window displays a list of parameters and their values. The parameters are organized into columns: 'Type', 'UNIT', 'DEF', 'T3', 'L', 'M', 'D', 'P', and 'Value'.

Type	UNIT	DEF	T3	L	M	D	P	Value
Tip Length								+40.00
Tip Diameter								+20.00
Working Length								+30.00
Working Parameter								+20.00
Type to Entrance Point (counter mark Manufactured)								1
Height counter with Press Item Manufactured								+0.00
Wear coefficient in Length								+0.00
Wear coefficient in diameter								+0.00
Max wear in Length								+0.00
Max wear in diameter								+0.00
Current Length								+0.00
Current Parameter								+20.00
Max. speed (if < 100 in m/min otherwise in mm/min)								+3.00
Standard speed (if < 100 in m/min otherwise in mm/min)								+3.00
Max Rotations/min								+800.00
Rotation standard speed								+800.00
Direction of rotation (rev, rev)								+
Speed (0.00 to 1.00 in m/min otherwise in mm/min)								+3.00
Unlocked tool change not allowed (0=NO, 1=YES)								0
Tool Counter position in K								1
Tool Counter position in V								1

The parameters 'Max. speed' and 'Standard speed' are highlighted with a red box in the original image, indicating their values are +3.00.

Dentre os parâmetros, foram utilizadas 4 velocidades de corte, definidas antes da criação do programa. Em um segundo momento foram utilizadas quatro velocidades de avanço, como na Figura 50. Assim, para cada ensaio foi criado um programa particular utilizando como base o primeiro, alterando nos ensaios. Durante a usinagem de cada peça de madeira foi primeiro utilizada uma velocidade de corte constante de $V_c = 10,9 \text{ m/s}$, sendo variada a velocidade de avanço. Depois foi fixada a velocidade de avanço $V_f = 5 \text{ m/min}$, sendo variada a velocidade de corte. Com isso definido, o programa foi feito e a peça pode ser preparada para a usinagem.

Após o programa estar pronto, a peça foi posicionada na máquina para ser usinada já com os comandos numéricos predefinidos e inseridos no banco de dados do equipamento. Na Figura 51 é apresenta a peça já usinada.

Figura 51 - Posicionamento da peça na CNC



A peça após ser usinada pode ser devidamente identificada e levada para a serra seccionadora, já apresentada, onde foram separadas as laterais periféricas usinadas da madeira (Figura 52). Essas laterais foram encaminhadas novamente para a serra seccionadora gerando por fim os corpos de prova com dimensões de 97 x 32 x 23 mm para medição da rugosidade das peças (Figura 53).

Figura 52 - Peça sendo cortada na serra seccionadora.



Figura 53 –Corpos de prova depois de prontos e identificados



4.7 TABELA DE DADOS

Os dados (R_a) foram obtidos no rugosímetro e as medições geraram uma matriz de dados para cada velocidade de corte (V_c) e para cada velocidade de avanço (V_f) usada na usinagem das peças (ANEXO A). Depois de feito isso, foi realizada uma análise estatística dentro dos dados da mesma a fim de responder as questões mais conclusivas deste trabalho.

Os dados dentro das matrizes foram divididos em 2 grupos onde são separados por velocidade de corte constante e por velocidade de avanço constante, de acordo com o tipo de fresamento, usinagem e sentido e são demonstrados a seguir na Tabela 3:

Tabela 3. Grupos e seus conjuntos

Velocidade de corte (V_c) - $V_c = 10,9$ m/s						
Grupo	A					
Tipo	Fresamento tangencial				Fresamento frontal	
Usinagem	Discordante		Concordante			
Sentido	Favor	Contra	Favor	Contra	Perpendicular	Paralelo
Velocidade de avanço (V_f) – $V_f = 5$ m/min						
Grupo	B					
Tipo	Fresamento tangencial				Fresamento frontal	
Usinagem	Discordante		Concordante			
Sentido	Favor	Contra	Favor	Contra	Perpendicular	Paralelo

4.8 MADEIRA DE EUCALIPTO

Os dados e grupos referentes à madeira de Eucalipto estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4. Dados Eucalipto

$V_c = 10,9$ m/s	$V_f = 5$ m/min
Grupo A	Grupo B
$V_f = 3$ m/min	$V_c = 5,9$ m/s
$V_f = 5$ m/min	$V_c = 8,4$ m/s
$V_f = 7$ m/min	$V_c = 10,9$ m/s
$V_f = 9$ m/min	$V_c = 13,4$ m/s

Foi feita a análise estatística ANOVA e Teste Tukey dos dados da matriz no software **R** (*The R Foundation for Statistical Computing*) versão 3.0.0 (2013).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados de rugosidade referentes ao fresamento de madeira de *Eucalyptus grandis* para diferentes velocidades de corte e de avanço, para fresamento tangencial (concordante e discordante, com percurso do rugosímetro a favor da velocidade de corte e com percurso do rugosímetro contra o sentido de corte) e para fresamento frontal perpendicular e paralelo às fibras. As matrizes de dados e os resultados das análises estatísticas estão dispostos no ANEXO A. Segue abaixo as descrições dos dados utilizados e seus respectivos resultados. Na tabela 6 estão expressos as rugosidades com velocidade de corte fixo $V_c = 10,9$ m/s e na Tabela 7 estão expresso às rugosidades com velocidade de avanço fixo $V_f = 5$ m/min.

5.1.1 Densidade básica e densidade aparente

Na tabela 5 estão expressos os valores médios , com os respectivos desvios para os valores de densidade básica e aparente do *Eucalyptus grandis* a 12% de umidade.

Tabela 5 - Valores médios de densidade básica e aparente para o *Eucalyptus grandis*.

Madeira	Densidade básica (g/cm ³)	Densidade aparente (g/cm ³)
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,58 ± 0,035	0,75 ± 0,036

Tabela 6 - Rugosidade Ra (μm) com velocidade de avanço (v_a) variando e $V_c = 10,9 \text{ m/s}$

Vf= 3 m/min						
	Fresamento tangencial				Fresamento frontal	
	Discordante		Concordante			
Medição	Favor	Contra	Favor	contra	Perpend.	Paralelo
1	2,6	6,2	7	5	11	6
2	4,8	4,6	4,2	6,6	18,8	7
3	5,6	5	3,6	6,6	12,8	7,4
4	6,2	4,2	3,8	5,8	12,2	6,6
5	5,4	6,2	4	6	9,6	6,6
6	7	7,4	6	8,8	12	5,2
Média	5,27	5,6	4,77	6,4	12,73	6,47
Desvio	1,3	1,1	1,27	1,18	2,9	0,71
Vf= 5 m/min						
	Fresamento tangencial				Fresamento frontal	
	Discordante		Concordante			
Medição	Favor	Contra	Favor	contra	Perpend.	Paralelo
1	6,6	6	4	8	18,8	9
2	3,8	9,4	7	8,4	14,6	9,2
3	5	4,2	4,2	8,4	14,4	9,4
4	3,4	5,4	6,8	8	12,4	8,4
5	7	6,8	8	7,2	12,8	8,6
6	3,4	4	5,4	11,2	19,2	10
Média	4,87	5,9	5,9	8,5	15,43	9,1
Desvio	1,4	1,82	1,48	1,26	2,67	0,53
Vf= 7 m/min						
	Fresamento tangencial				Fresamento frontal	
	Discordante		Concordante			
Medição	Favor	Contra	Favor	contra	Perpend.	Paralelo
1	6,8	6,8	5,2	3,8	11,62	10,6
2	6,2	6,4	4,4	5,8	12,4	14
3	6,6	5,6	5,2	3,8	15,4	9,4
4	4,6	5,6	3,6	4,6	17,6	9,8
5	8	5,8	4,4	4,2	10,8	9,6
6	5,4	5,2	3,4	8,4	13,8	12,4
Média	6,27	5,9	4,37	5,1	13,53	10,97
Desvio	1	0,54	0,7	1,62	2,39	1,69
Vf= 9 m/min						
	Fresamento tangencial				Fresamento frontal	
	Discordante		Concordante			
Medição	Favor	Contra	Favor	contra	Perpend.	Paralelo
1	4,6	4,8	11	8	13,6	11,2
2	8,2	8	6,4	7,2	15,8	9,2
3	6,6	8,2	8,8	14	15	11,4
4	6,2	6,8	8,2	7,6	15,4	10,8
5	3,2	4,4	6,2	9,8	18,2	13,2
6	5,4	11	5,4	9,4	13,8	11,8
Média	5,7	7,1	7,63	9,3	15,3	11,27
Desvio	1,5	2,17	1,84	2,22	1,52	1,19

Tabela 7 Rugosidade (μm) com Velocidade de corte variando e v_f fixo= 5 m/min

n=7000 RPM e V_c= 5,9 m/s						
	Fresamento tangencial				Fresamento frontal	
	Discordante		Concordante			
Medição	Favor	Contra	Favor	contra	Perpend.	Paralelo
1	2,4	3,8	5,8	5,8	20,4	12,2
2	6,8	5,2	4,6	6	22,8	11,6
3	8,4	9,2	5,6	6,8	24,6	9,8
4	8,2	9,6	7,6	7	20,6	10,2
5	7,2	6	8,8	11,6	28	14
6	7,2	8	4,2	6,6	26,8	12,4
Média	6,7	6,9	6,1	7,3	23,87	11,7
Desvio	2	2,12	1,62	1,97	2,89	1,41
n= 10000 RPM e V_c= 8,4 m/s						
	Fresamento tangencial				Fresamento de frontal	
	Discordante		Concordante			
Medição	Favor	Contra	Favor	contra	Perpend.	Paralelo
1	2,6	2,6	4,6	6,8	13,8	6,6
2	3	5,6	7,2	7,8	11	7,8
3	6,6	6,6	4	9,8	10,6	9,2
4	5,8	5,8	4	5	12,2	7,6
5	2,8	4	4,6	4,6	11,4	10,6
6	3,8	4	3,6	5,2	14,2	7
Média	4,1	4,7	4,67	6,5	12,2	8,13
Desvio	1,55	1,35	1,19	1,84	2,37	1,37
n= 13000 RPM e V_c= 10,9 m/s						
	Fresamento tangencial				Fresamento frontal	
	Discordante		Concordante			
Medição	Favor	Contra	Favor	Contra	Perpend.	Paralelo
1	6,6	6	4	8	18,8	9
2	3,8	9,4	7	8,4	14,6	9,2
3	5	4,2	4,2	8,4	14,4	9,4
4	3,4	5,4	6,8	8	12,4	8,4
5	7	6,8	8	7,2	12,8	8,6
6	3,4	4	5,4	11,2	19,2	10
Média	4,87	5,9	5,9	8,5	15,43	9,1
Desvio	1,4	1,82	1,48	1,26	2,67	0,53
n=16000 RPM e V_c= 13,4 m/s						
	Fresamento tangencial				Fresamento frontal	
	Discordante		Concordante			
Medição	Favor	Contra	Favor	Contra	Perpend.	Paralelo
1	5	5,2	6,2	4,2	10,6	10,6
2	5	6	3,4	8,8	13	12
3	5,2	6,6	5,6	6,6	12,4	9,6
4	5	7	3,2	4	9,4	14
5	4,8	7,6	3,6	9,4	11,2	9,4
6	6	6,2	3,8	7,8	13,2	10,6
Média	5,17	6,4	4,3	6,8	11,63	11,03
Desvio	0,3	0,76	1,16	2,1	1,36	1,57

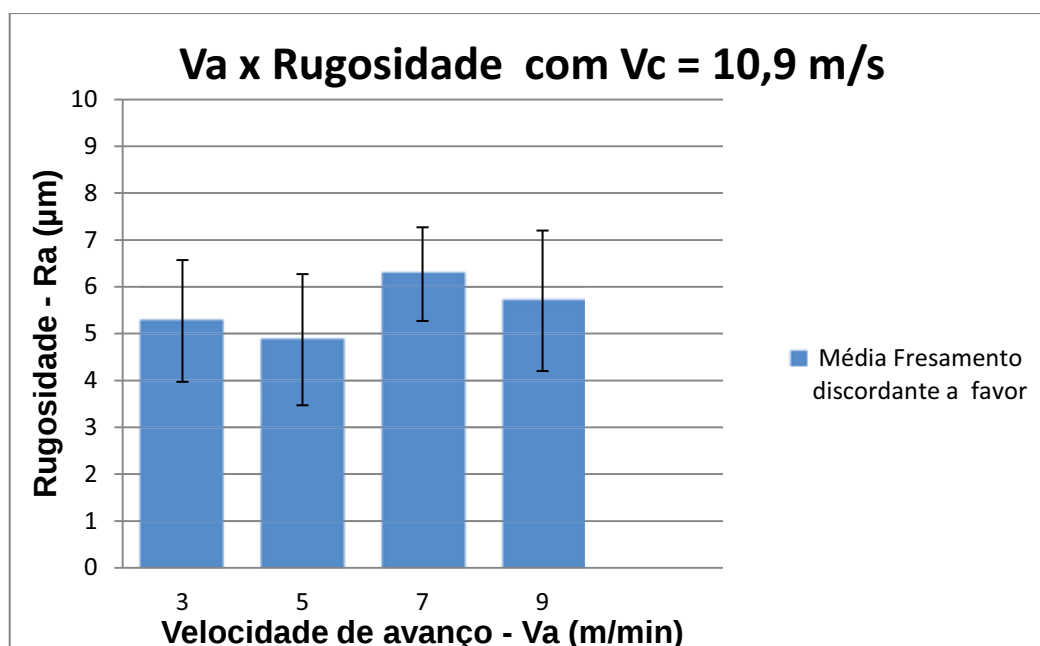
5.1.2 Fresamento discordante a favor

Os valores médios de rugosidade coletados após o processo de fresamento, com seus respectivos valores de desvio padrão para as diferentes velocidades de avanço testadas utilizando velocidade de corte ($V_c = 10,9$ m/s) estão inseridos na Tabela 8, e deram origem ao gráfico (Figura 53).

Tabela 8. Valores médios de rugosidade no sentido discordante a favor para diferentes velocidades de avanço.

Velocidade de avanço (m/min)	Rugosidade no sentido discordante a favor (μm)	Desvio Padrão (μm)
3	5,27	1,3
5	4,87	1,4
7	6,27	1,0
9	5,70	1,5

Figura 54 – Gráfico de rugosidade no sentido discordante a favor para diferentes velocidades de avanço.

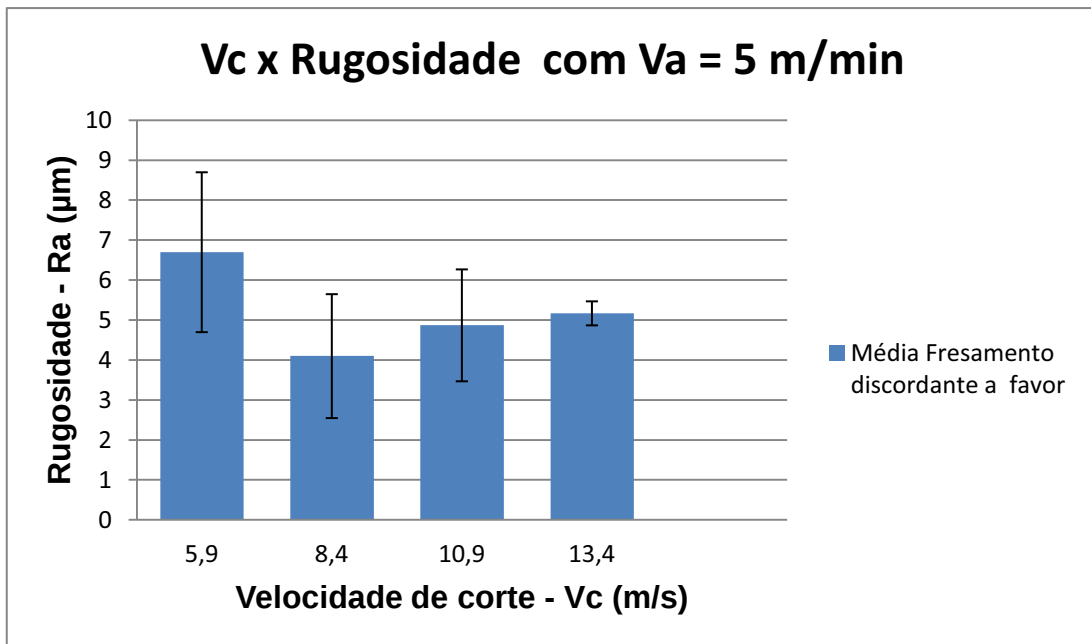


Os valores médios de rugosidade coletados após o processo de fresamento, com seus respectivos valores de desvio padrão para as diferentes velocidades de corte testadas utilizando velocidade de $V_f = 5$ m/min estão inseridos na Tabela 9, e deram origem ao gráfico (Figura 55).

Tabela 9. Valores médios de rugosidade no sentido discordante a favor para diferentes velocidades de corte.

Velocidade de corte (m/s)	Rugosidade no sentido discordante a favor (µm)	Desvio Padrão (µm)
5,9	6,70	2,00
8,4	4,10	1,55
10,9	4,87	1,40
13,4	5,17	0,30

Figura 55 - Gráfico de rugosidade no sentido discordante a favor para diferentes velocidades de corte.



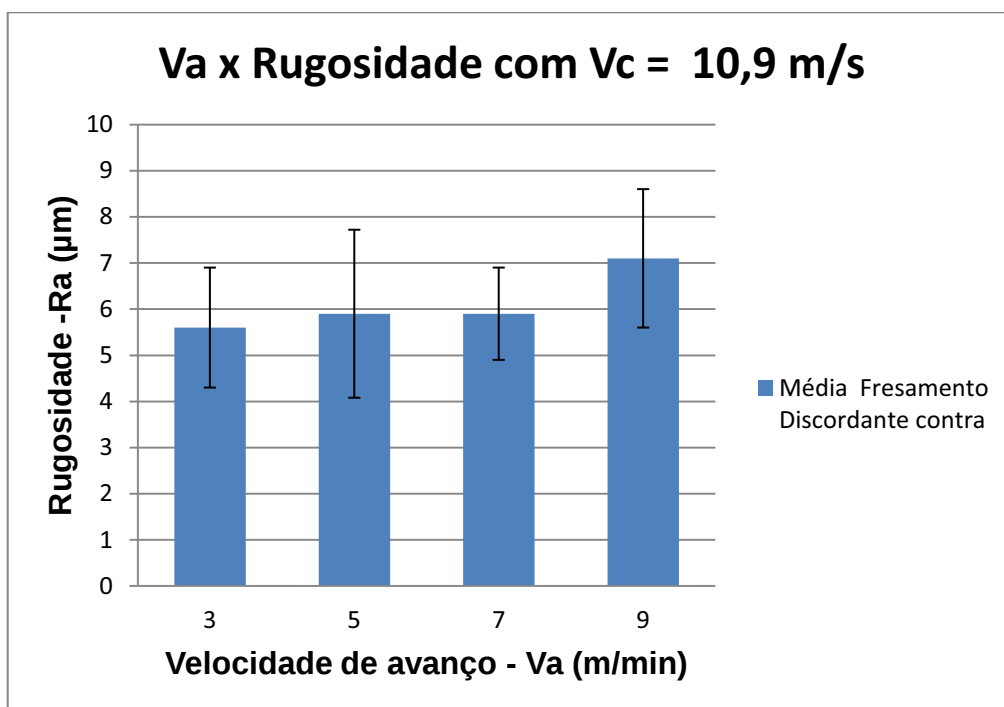
5.1.3 Fresamento discordante contra

Os valores médios de rugosidade coletados após o processo de fresamento, com seus respectivos valores de desvio padrão para a velocidade de corte ($V_c = 10,9$ m/s) estão inseridos na Tabela 10, e deram origem ao gráfico (Figura 56).

Tabela 10. Valores médios de rugosidade no sentido discordante contra para diferentes velocidades de avanço.

Velocidade de avanço (m/min)	Rugosidade no sentido discordante contra (μm)	Desvio Padrão (μm)
3	5,6	1,3
5	5,9	1,8
7	5,9	1,0
9	7,1	1,5

Figura 56 - Gráfico de rugosidade no sentido discordante contra para diferentes velocidades de avanço

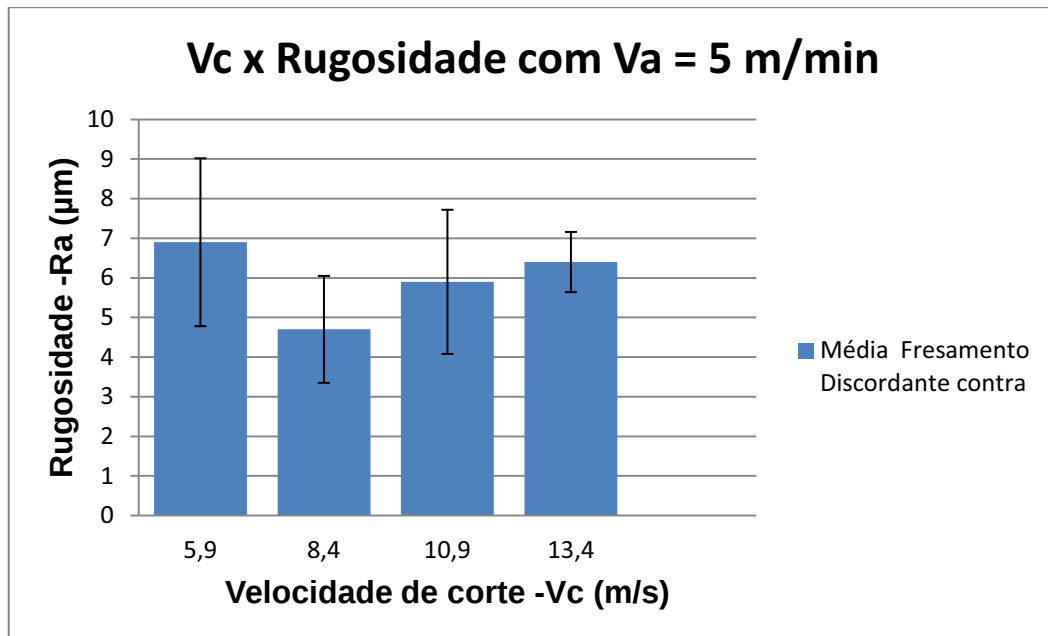


Os valores médios de rugosidade coletados após o processo de fresamento, com seus respectivos valores de desvio padrão para a velocidade de avanço ($V_f = 5 \text{ m/min}$) estão inseridos na Tabela 11 e deram origem ao gráfico (Figura 57).

Tabela 11. Valores médios de rugosidade no sentido discordante contra para diferentes velocidades de corte.

Velocidade de corte (m/s)	Rugosidade no sentido discordante contra (μm)	Desvio Padrão (μm)
5,9	6,9	2,12
8,4	4,7	1,35
10,9	5,9	1,82
13,4	6,4	0,76

Figura 57 - Gráfico de rugosidade no sentido discordante contra para diferentes velocidades de corte.



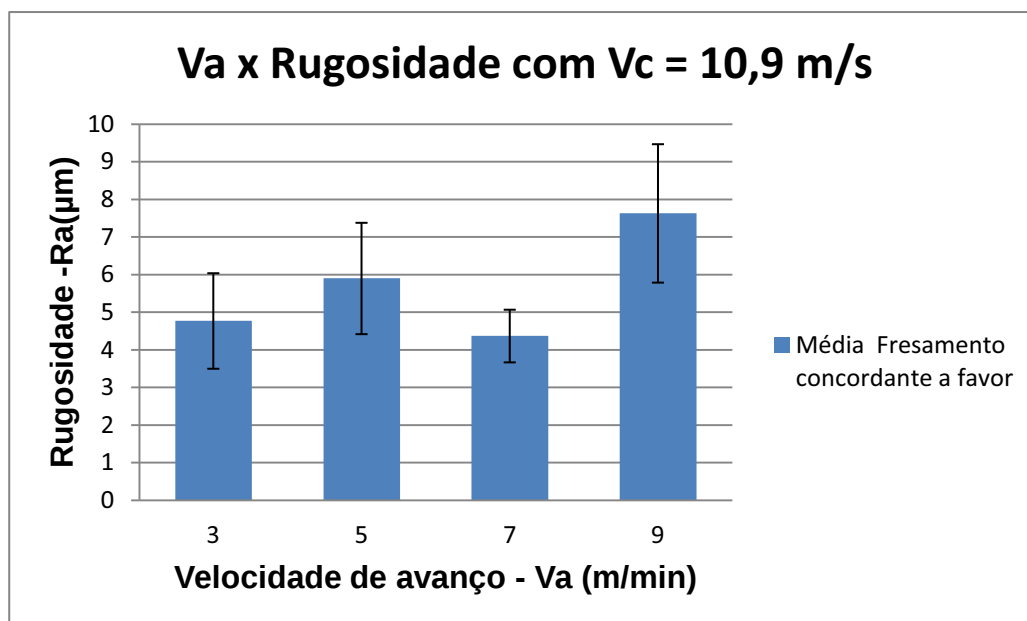
5.1.4 Fresamento concordante a favor

Os valores médios de rugosidade coletados após o processo de fresamento, com seus respectivos valores de desvio padrão para a velocidade de corte ($V_c = 10,9$ m/s) estão inseridos na Tabela 12, e deram origem ao gráfico (Figura 58).

Tabela 12. Valores médios de rugosidade no sentido concordante a favor para diferentes velocidades de avanço.

Velocidade de avanço (m/min)	Rugosidade no sentido concordante a favor (µm)	Desvio Padrão (µm)
3	4,77	1,27
5	5,90	1,48
7	4,37	0,70
9	7,63	1,84

Figura 58 - Gráfico de rugosidade no sentido concordante a favor para diferentes velocidades de avanço.

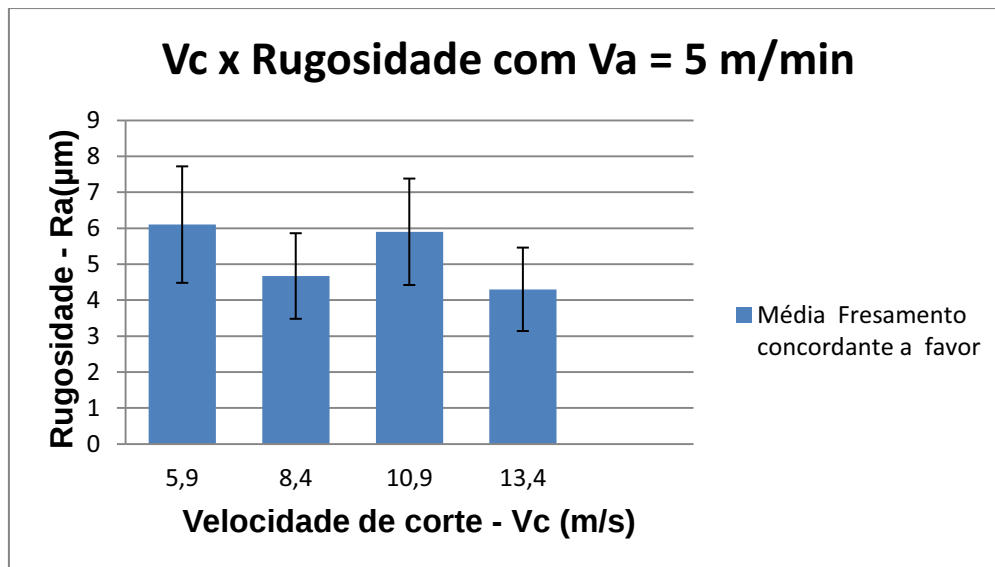


Os valores médios de rugosidade coletados após o processo de fresamento, com seus respectivos valores de desvio padrão para a velocidade de avanço ($V_f = 5 \text{ m/min}$) estão inseridos na Tabela 13, e deram origem ao gráfico (Figura 59).

Tabela 13. Valores médios de rugosidade no sentido concordante a favor para diferentes velocidades de corte.

Velocidade de corte (m/s)	Rugosidade no sentido concordante á favor (μm)	Desvio Padrão (μm)
5,9	6,10	1,62
8,4	4,67	1,19
10,9	5,90	1,48
13,4	4,30	1,16

Figura 59 - Gráfico de rugosidade no sentido concordante a favor para diferentes velocidades de corte.



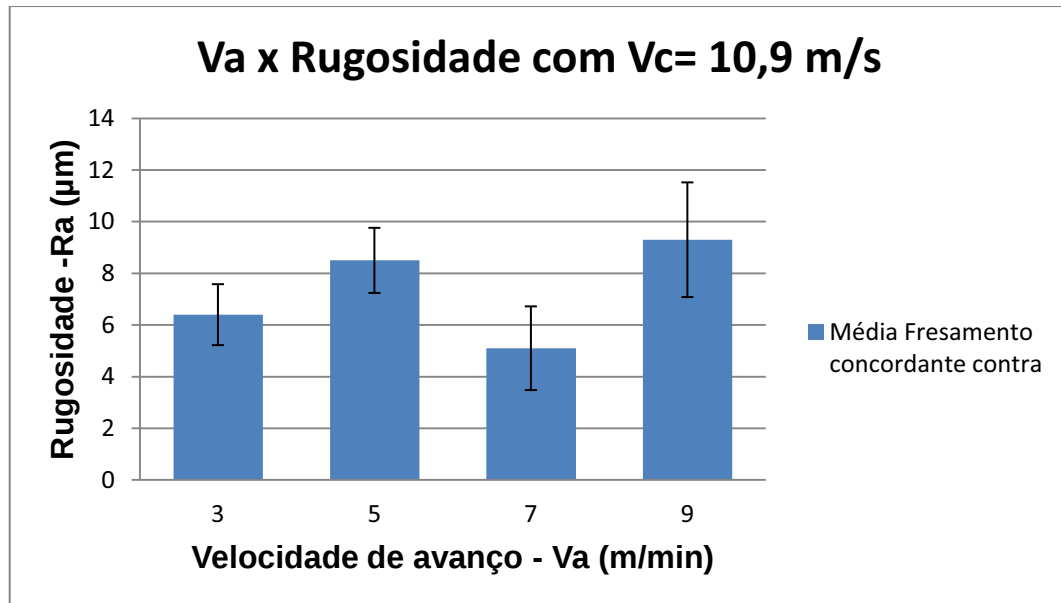
5.1.5 Fresamento concordante contra

Os valores médios de rugosidade coletados após o processo de fresamento, com seus respectivos valores de desvio padrão para a velocidade de corte ($V_c = 10,9$ m/s) estão inseridos na Tabela 14, e deram origem ao gráfico (Figura 60).

Tabela 14. Valores médios de rugosidade no sentido concordante contra para diferentes velocidades de avanço.

Velocidade de avanço (m/min)	Rugosidade no sentido concordante contra (μm)	Desvio Padrão (μm)
3	6,4	1,18
5	8,5	1,26
7	5,1	1,62
9	9,3	2,22

Figura 60 - Gráfico rugosidade no sentido concordante contra para diferentes velocidades de avanço.

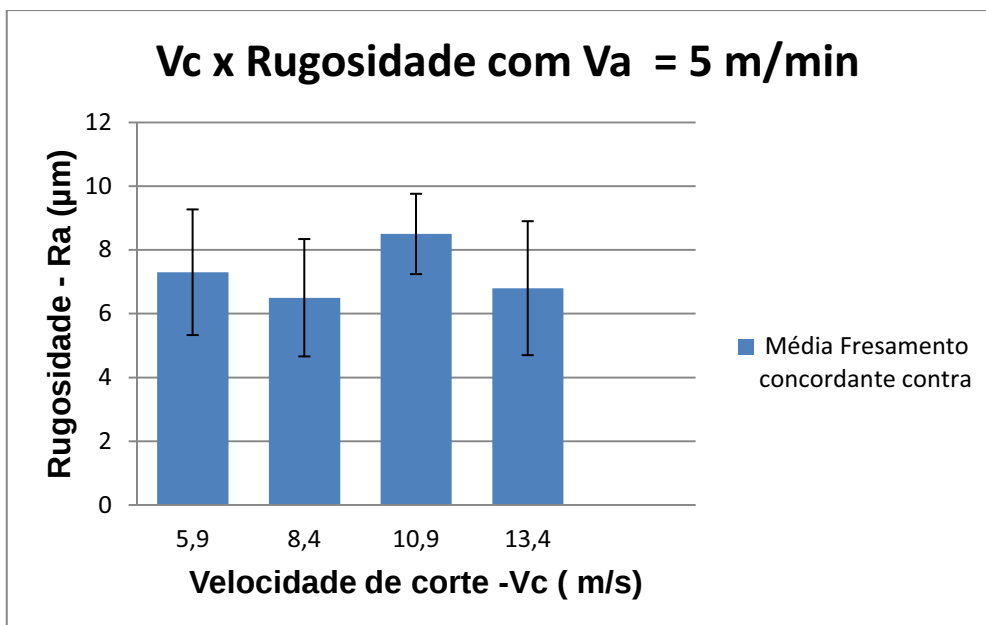


Os valores médios de rugosidade coletados após o processo de fresamento, com seus respectivos valores de desvio padrão para a velocidade de avanço ($V_f = 5 \text{ m/min}$) estão inseridos na Tabela 15, e deram origem ao gráfico (Figura 61).

Tabela 15. Valores médios de rugosidade no sentido concordante contra para diferentes velocidades de corte.

Velocidade de corte (m/s)	Rugosidade no sentido concordante contra (µm)	Desvio Padrão (µm)
5,9	7,3	1,97
8,4	6,5	1,84
10,9	8,5	1,26
13,4	6,8	2,10

Figura 61 - Gráfico de rugosidade no sentido concordante contra para diferentes velocidades de corte.



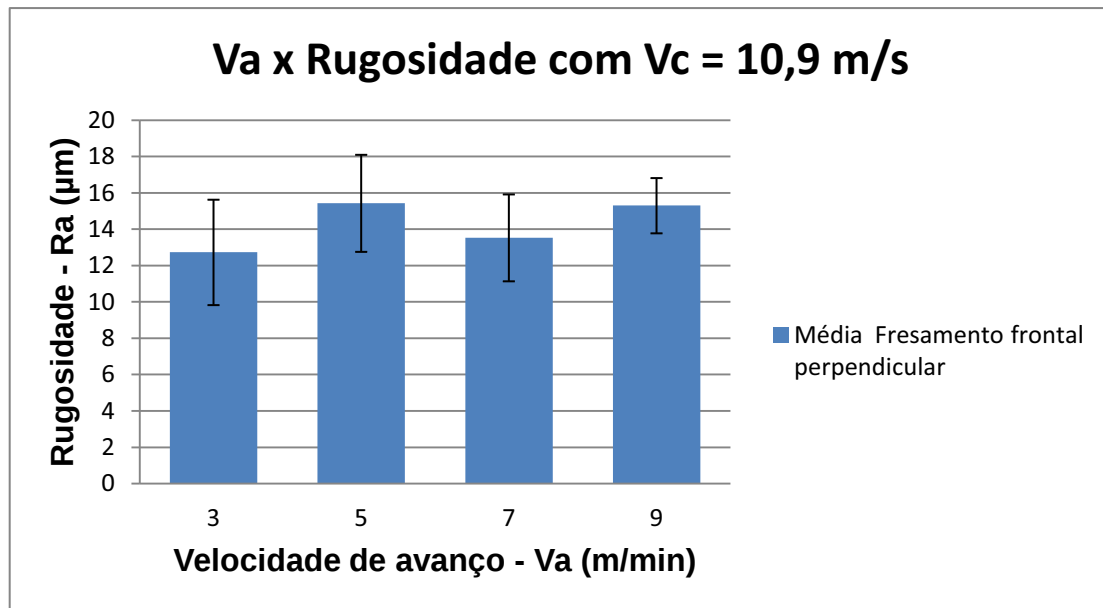
5.1.5 Fresamento frontal perpendicular

Os valores médios de rugosidade coletados após o processo de fresamento, com seus respectivos valores de desvio padrão para a velocidade de corte ($V_c = 10,9$ m/s) estão inseridos na Tabela 16, e deram origem ao gráfico (Figura 62).

Tabela 16. Valores médios de rugosidade no sentido frontal perpendicular para diferentes velocidades de avanço.

Velocidade de avanço (m/min)	Rugosidade no sentido frontal perpendicular (µm)	Desvio Padrão (µm)
3	12,73	2,90
5	15,43	2,67
7	13,53	2,39
9	15,30	1,52

Figura 62 - Gráfico de rugosidade no sentido frontal perpendicular para diferentes velocidades de avanço.

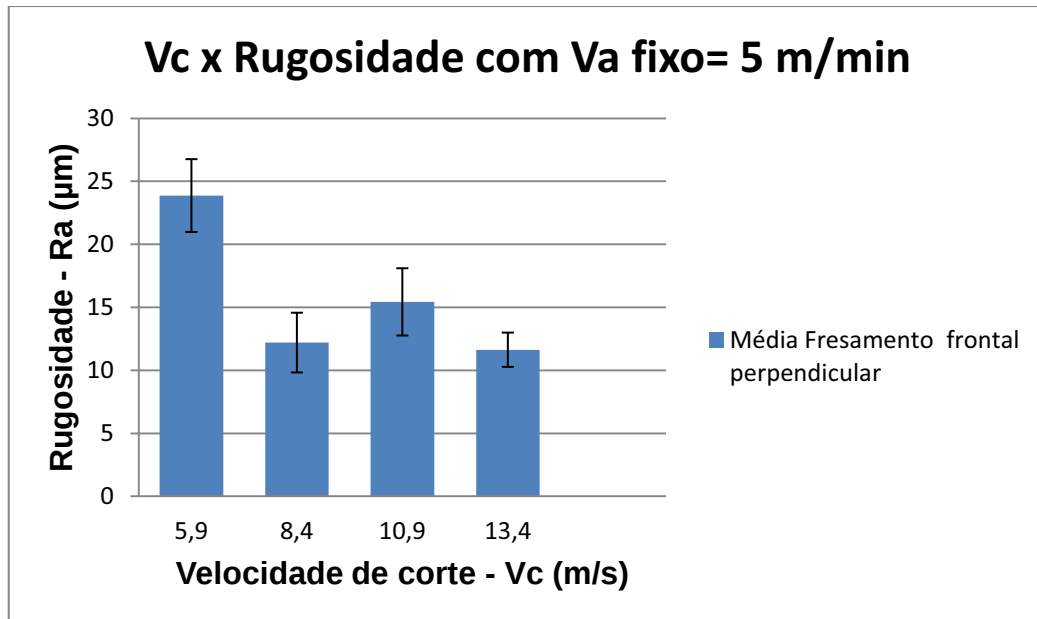


Os valores médios de rugosidade coletados após o processo de fresamento, com seus respectivos valores de desvio padrão para a velocidade de avanço ($V_f = 5 \text{ m/min}$) estão inseridos na Tabela 17, e deram origem ao gráfico (Figura 63).

Tabela 17. Valores médios de rugosidade no sentido frontal perpendicular para diferentes velocidades de corte.

Velocidade de corte (m/s)	Rugosidade no sentido frontal perpendicular (μm)	Desvio Padrão (μm)
5,9	23,87	2,89
8,4	12,20	2,37
10,9	15,43	2,67
13,4	11,63	1,36

Figura 63 - Gráfico de rugosidade no sentido frontal perpendicular para diferentes velocidades de corte.



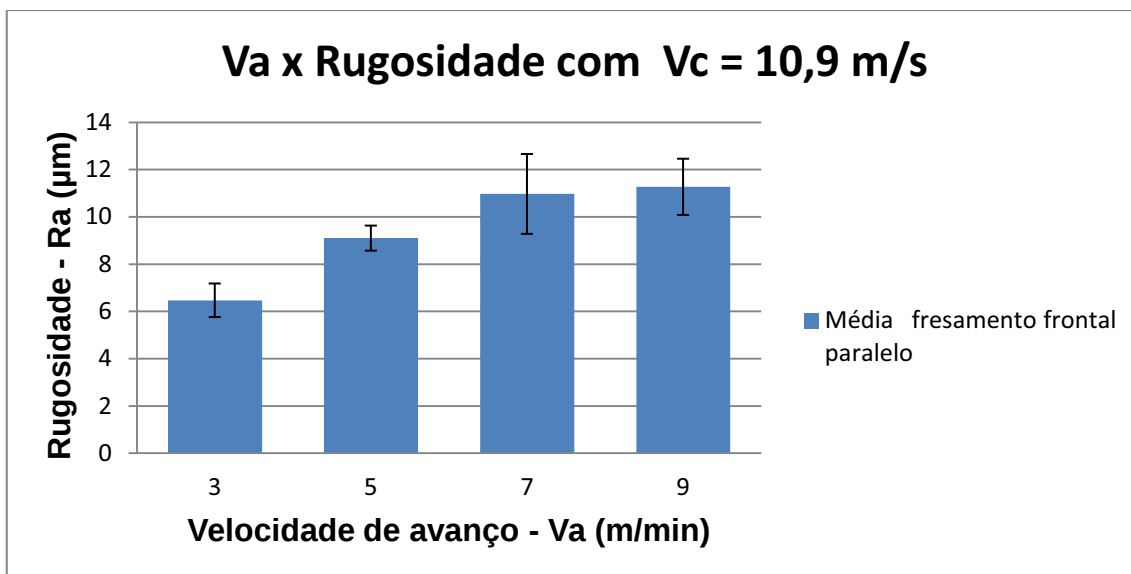
5.1.6 Fresamento frontal paralelo

Os valores médios de rugosidade coletados após o processo de fresamento, com seus respectivos valores de desvio padrão para a velocidade de corte ($V_c = 10,9$ m/s) estão inseridos na Tabela 18 e deram origem ao gráfico (Figura 64).

Tabela 18. Valores médios de rugosidade no sentido frontal paralelo para diferentes velocidades de avanço.

Velocidade de avanço (m/min)	Rugosidade no sentido frontal paralelo (µm)	Desvio Padrão (µm)
3	6,47	0,71
5	9,10	0,53
7	10,97	1,69
9	11,27	1,19

Figura 64 - Gráfico de rugosidade no sentido frontal paralelo para diferentes velocidades de avanço.

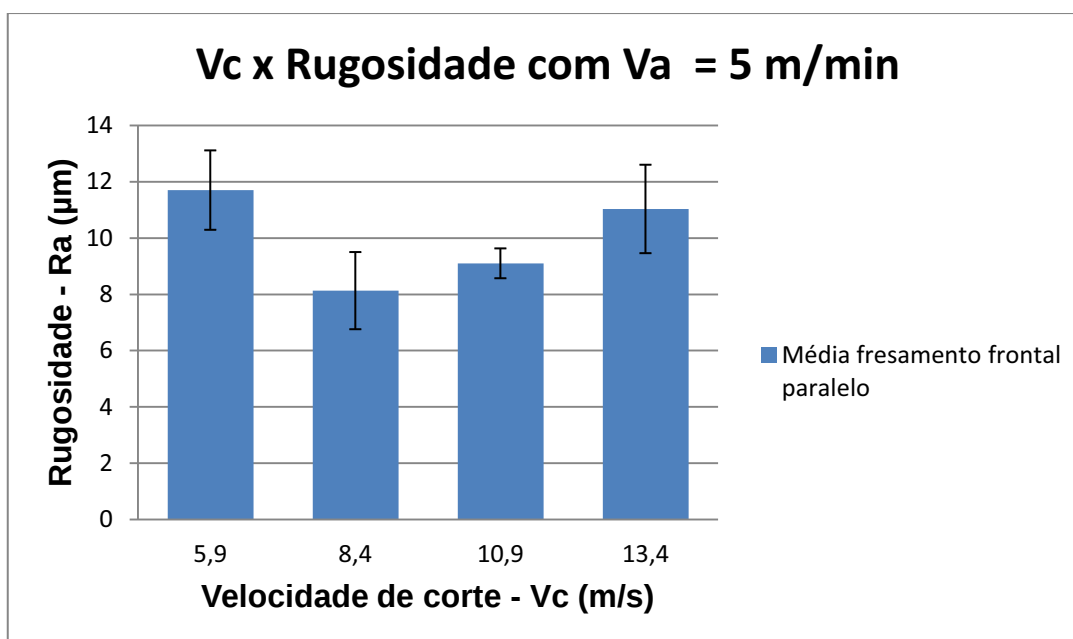


Os valores médios de rugosidade coletados após o processo de fresamento, com seus respectivos valores de desvio padrão para a velocidade de avanço ($V_f = 5$ m/min) estão inseridos na Tabela 19, e deram origem ao gráfico (Figura 65).

Tabela 19 - Valores médios de rugosidade no sentido frontal paralelo para diferentes velocidades de corte.

Velocidade de corte (m/s)	Rugosidade no sentido frontal paralelo (μm)	Desvio Padrão (μm)
5,9	11,7	1,41
8,4	8,13	1,37
10,9	9,10	0,53
13,4	11,03	1,57

Figura 65 - Gráfico de rugosidade no sentido frontal paralelo para diferentes velocidades de corte.



Observando os gráficos 54, 56, 58, 60, 62 e 64 vimos que há uma tendência de que quando se aumenta a velocidade de avanço piora o acabamento, o que pode ser confirmado por Machado et al.(2009) que fala que um aumento na velocidade de avanço resulta em um aumento na rugosidade. Isso se deve à maior quantidade de material retirada em cada dente da fresa.

Segundo Castro (2000) e Silva (2002) observa-se uma tendência crescente de valores do parâmetro Ra conforme o aumento da velocidade de avanço.

As medições de rugosidade na operação de fresamento nem sempre apresentam resultados coerentes com o citado na literatura específica sobre usinagem. É o que podemos observar nos gráficos 55, 57, 59, 61, 63 e 65 que possuem um comportamento atípico de aumento da rugosidade com o aumento da velocidade de corte. Segundo Machado et al.(2009) o acabamento melhora, quando aumenta a velocidade de corte. Isso se deve à menor quantidade de material retirada em cada dente da fresa .

Normalmente velocidades de corte mais elevadas resultam em melhor acabamento superficial. Oliveira et al (2003) e Schulzs (2003). Uma possível explicação para o que tenha ocorrido nos experimentos é que com a utilização de velocidade de corte mais elevada ($V_c = 10,9$ m/s) exige elevada rotação do eixo- árvore, esta imprime maior vibração no conjunto da fresa, trazendo como consequência aumento da instabilidade do sistema máquina- ferramenta, com agravo na qualidade do acabamento.

Através dessa pré –análise, viu-se a necessidade de uma análise de variância para ter uma interpretação mais apurada dos resultados.

5.2 RESULTADO DA ANÁLISE DOS GRUPOS

(ANOVA e Teste Tukey com 5% de significância)

5.2.1 Grupo A ($V_c = 10,9$ m/s)

A análise de variância realizada mostrou diferença significativa entre a velocidade de avanço (P-value < 5%) e também entre os sentidos de medição (P-value < 5%). Os dados da análise de variância são exibidos na Tabela 20, que nos indica que todos os fatores foram significativos.

Tabela 20 Análise de variância de rugosidade no fresamento do *Eucalyptus grandis* para o grupo A.

Fatores	GI	F	Valor – P
Velocidade de avanço	3	12.5717	3.334e-07
Sentido	5	83.1730	2.2e-16
Velocidade de avanço x sentido	15	2.4278	0.004039

No caso das velocidades de avanço, para saber qual delas diferiu significativamente, foi realizado o teste Tukey, como mostra a tabela 21 (Quando houver letras iguais, as médias não diferem e quando as letras forem diferentes as médias diferem.)

Tabela 21 –Teste Tukey

Eucalipto	Vf1(m/min)	Vf2 (m/min)	Vf3 (m/min)	Vf4 (m/min)
	A	B	AB	C

Pelos resultados observa-se que para o Grupo A as velocidades de avanço Vf1, Vf2, e Vf4 diferem estatisticamente. Vf1 difere de Vf4, mas não difere de Vf2 e Vf3.

No caso do tipo de corte, para saber qual delas diferiu significativamente, foi realizado o teste Tukey, como mostra a tabela 22.

Tipo de corte: Onde: CC= Concordante contra; CF=Concordante a favor; DC= Discordante contra; DF= Discordante a favor; FPE= frontal perpendicular; FP= frontal paralelo.

Tabela 22 – Teste Tukey:

Eucalipto	CC	CF	DC	DF	FPE	FP
	A	B	ABC	C	D	E

Pelos resultados observamos que para o Grupo A o corte concordante contra e concordante a favor diferiram entre si. Já para o corte discordante contra e discordante a favor não houve diferença significativa. Para o corte frontal perpendicular e frontal paralelo percebemos que diferiram entre si. Para o corte concordante contra e discordante contra percebemos que não diferiram

entre si. Já para concordante a favor e discordante a favor percebemos que diferiram.

5.2.2 Grupo B ($V_f=5$ m/min)

A análise de variância mostrou diferença significativa entre a velocidade de corte (P-value < 5%) e também entre os sentidos de medição (P-value < 5%). Os dados da análise de variância são exibidos na Tabela 23, que nos indica que todos os fatores foram significativos.

Tabela 23 Análise de variância de rugosidade no fresamento do *Eucalyptus grandis* para o grupo B.

Fatores	GI	F	Valor – P
Velocidade de corte	3	27.6559	1.149e-13
Sentido	5	122.3074	2.2e-16
Velocidade de corte x sentido	15	8.4519	6.813e-13

No caso das velocidades de corte, para saber qual delas diferiu significativamente, foi realizado o teste Tukey, como mostra a tabela 24.

Tabela 24 – Teste de Tukey

Eucalipto	Vc1 (m/s)	Vc2 (m/s)	Vc3 (m/s)	Vc4 (m/s)
	B	A	C	AC

Pelos resultados observa-se que para o Grupo B as velocidades de corte Vc1, Vc2 e Vc3 diferem estatisticamente. Vc4 difere de Vc1, mas não difere nem de Vc2 nem de Vc3.

No caso do tipo de corte, para saber qual delas diferiu significativamente, foi realizado o teste Tukey, como mostra a tabela 25.

Tabela 25 – Teste Tukey

Eucalipto	CC	CF	DC	DF	FPE	FP
	B	A	AB	A	C	D

Pelos resultados observa-se que para o Grupo B o corte concordante contra e concordante a favor diferiram entre si. Já no corte discordante contra e discordante a favor percebe-se que não diferiram. Para o corte frontal perpendicular e frontal paralelo observa-se que diferiram entre si. Para o corte concordante contra e discordante contra não diferiram entre si assim como o corte concordante a favor e discordante a favor.

6 CONCLUSÃO

A metodologia mostrou-se eficiente e precisa, dando agilidade ao processo e preservando a qualidade das peças usinadas.

Pode-se observar que para a velocidade de corte constante $V_c = 10,9$ m/s o melhor acabamento foi alcançado com a velocidade de avanço $v_f = 7$ m/min no fresamento concordante a favor.

Já para a velocidade de avanço constante $V_f = 5$ m/min o melhor acabamento foi alcançado com a velocidade de corte $V_c = 8,4$ m/s no fresamento discordante a favor.

Pode-se observar que tanto a variação da velocidade de corte como a variação da velocidade de avanço influenciaram na rugosidade.

Os sentidos contra e a favor da velocidade de corte apresentaram resultados diferentes no corte concordante. Já para o corte discordante os sentidos contra e à favor não apresentaram diferenças significativas.

Os resultados dos ensaios mostraram que não houve diferença significativa nos cortes concordante e discordante. Já para concordante e frontal. E discordante e frontal houve diferença significativa de rugosidade.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF – **Anuário estatístico da Associação Brasileira dos Produtores de Florestas Plantadas**, ano base 2006, 2007.

ALMEIDA, A.L.M -**Estudo do fresamento de madeiras em centro de usinagem CNC**. 103f . Trabalho de Graduação - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- Campus Experimental de Itapeva, Itapeva, 2013.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1988). *NBR – 6162/88 – Conceito da Técnica de Usinagem, Movimentos e Relações Geométricas – Terminologia*. São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2002). *NBR – ISO 4287/2002 - Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: método do perfil – Termos, definições e parâmetros de rugosidade*. ABNT, 2002.

BIANCHI, Kleber Eduardo. **Concepção de uma máquina CNC para medição e usinagem de peças de madeira**. 1996. Dissertação. Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, UFSC, Florianópolis.

CASTRO,E.M. **Estudo da usinabilidade de chapas de MDF para usinagem de desbaste e acabamento** . 2000.122p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia dos materiais) Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2000.

COSTA, E. S. **“Disciplina: Processo de Usinagem”**.Divinópolis, MG. 2006. 6p.

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

DINIZ, A.E.; MARCONDES,F.C.; COPPINI, N.L.- **Tecnologia da Usinagem dos materiais**. Artliber editora, São Paulo, Brasil, 2006. 255p.

DROZDA, T. J.; WICK, C. **Tool and manufacturing engineers handbook – Machining**, n. 4. v.1. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers, 1983. p. 1.1- 1.66, p. 10.1-10.76.

FERRARESI, D. – **Fundamento da Usinagem dos metais**. Editora Edigard Blucher Ltda, São Carlos, Brasil, 1969. 790p.

FIELD, M.; KAHLES, J. F.; KOSTER, W. P. **Surface finish and surface integrity**. In: DAVIS, J.R. (Ed.) et al. **Metals handbook: machining**. Ohio: ASM, 1999. v. 16, p. 43-84. Versão digital

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

GONÇALVES, M. T. T. **Usinagem dos metais**. Apostila da disciplina de graduação de Usinagem dos Materiais do curso de graduação em Engenharia Mecânica. FEB - UNESP, Bauru, 2002.

GONÇALVES, M. T. T. **Processos de Usinagem a Comando Numérico Computadorizado (CNC)**. Apostila da disciplina de graduação de Usinagem à CNC do curso de graduação em Engenharia Mecânica. FEB - UNESP, Bauru, 2004.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of Modern Manufacturing**. Materials, processes, and systems. New Jersey: Ed. John Wiley & Sons, 2002.

HIOKI, D. Influência **dos Parâmetros de Corte do Fresamento HSM sobre o Desempenho Tribológico do Aço AISI H13 Endurecido**. 2006. 233p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – USP, São Paulo.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren, Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren**. 6.ed. Berlin: Springer Verlag, 1999. 471p.

LOPES, C.S.D – Caracterização da madeira de três espécies de eucalipto para uso em movelaria.- Dissertação (mestrado) em recursos florestais. USP-ESALQ, Piracicaba, 2007.

LYRA, PABLO V. A., (2010). **Desenvolvimento de uma Máquina Fresadora CNC Didática**. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 123p.

MACHADO, A.R; ABRÃO, A.M; COELHO, R.T; SILVA, M.B – **Teoria da Usinagem dos materiais**. – São Paulo: Editora Blucher, 2009. 371p

MARCELINO, A. P.; DOMINGOS, D. C.; CAMPOS D. V.; SCHROETER R. B. **Medição e simulação dos esforços de usinagem no fresamento de topo reto de ligas de alumínio tratável termicamente 6061**. In: CONGRESSO ESTUDANTIL DE ENGENHARIA MECÂNICA- CREEM, 11., 2004, Nova Friburgo. **Anais**. Nova Friburgo: Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2004. Não paginado.

OLIVEIRA, A.C., AHRENS, C. H. e SCHROETER, R. B. **Sistemas CAM para o Fresamento em Altas Velocidades de Moldes e Matrizes**. São Paulo: O Mundo da Usinagem, 2ª ed., pág. 12 – 17. Artigo, 2003. 6 p.

PALMA, E. S, **Tolerância de Acabamento – Rugosidade**. 2006. 20p. (Apostila de Metrologia) - PUC MINAS.

REDDY, N. S. e RAO, P. V. 2005. **Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling**. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 26, 1202 – 1210.

REZENDE, M. A.; ESCOBEDO, J.F.; FERRAZ, E.S.B. **Retratibilidade volumétrica e densidade aparente da madeira em função da umidade**. IPEF, Piracicaba, n. 39, p. 33-40, 1988.

SANDVIK ,C. **Manual Técnico de Usinagem**. Elanders, Suécia, 2005

SCHULZ, H. E SCHÜTZER, K. **Histórico da Usinagem com Altíssima Velocidade até os Dias Atuais**. In. VÁRIOS AUTORES. **Usinagem em Altíssimas Velocidades – Como os Conceitos HSM/HSC podem revolucionar a indústria metal-mecânica**. 2. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda. 2003. cap.1, p. 13-28. 214 p. ISBN 85-7194-974-3.

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

SCM GROUP S.P.A (Italy). **Manual de Instruções: Furadeira - Fresadora CNC**. Rel. 4.1 / 01 - 2011 Rimini (rn): Scm Group S.p.a, 2011. 340 p. (TECH Z1).

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando sua utilização na indústria moveleira**. 2002. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação em engenharia florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SILVA, J.C. **Caracterização da madeira de *eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden de diferentes idades visando sua utilização na indústria moveleira**. 2002.160p. Tese (Doutorado em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais) UFPR, Curitiba, 2002.

SLACK, N. et. al. **Administração da Produção**. São Paulo: Atlas, 1996.

SOUZA, A.J – **Processos de fabricação por usinagem**. Apostila da Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia Mecânica- UFRGS, 2011.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995. 249 p.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995. 314 p.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscas, fresas, brochas, rebolos e abrasivos**. – Florianópolis: Ed. da UFSC, 1992.

VITAL, B.R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa-MG: SIF, 1984. 21p.(Boletim Técnico, 2).

WEINGAERTNER, Walter Lindolfo; SCHROETER, R.B. **Introdução aos Processos de Usinagem**: parte 1. Universidade Federal de Santa Catarina, 2002. 352 p. Apostila .

8 ANEXO A

8.1 TABELA DE DADOS

GRUPO A - Rugosidade- Ra (μm) .Onde:

Vf₁= 3 m/mim ; Vf₂= 5 m/min; Vf₃= 7 m/min; Vf₄= 9 m/mim

GRUPO A						
Dados - Rugosidade – Ra (μm) com Vc = 10,9 m/s						
	Fresamento tangencial				Fresamento frontal	
	Discordante		Concordante			
	Favor	Contra	Favor	Contra	Perpendicular	Paralelo
Vf1	2,6	6,2	7	5	11	6
Vf1	4,8	4,6	4,2	6,6	18,8	7
Vf1	5,6	5	3,6	6,6	12,8	7,4
Vf1	6,2	4,2	3,8	5,8	12,2	6,6
Vf1	5,4	6,2	4	6	9,6	6,6
Vf1	7	7,4	6	8,8	12	5,2
Vf2	6,6	6	4	8	18,8	9
Vf2	3,8	9,4	7	8,4	14,6	9,2
Vf2	5	4,2	4,2	8,4	14,4	9,4
Vf2	3,4	5,4	6,8	8	12,4	8,4
Vf2	7	6,8	8	7,2	12,8	8,6
Vf2	3,4	4	5,4	11,2	19,2	10
Vf3	6,8	6,8	5,2	3,8	11,2	10,6
Vf3	6,2	6,4	4,4	5,8	12,4	14
Vf3	6,6	5,6	5,2	3,8	15,4	9,4
Vf3	4,6	5,6	3,6	4,6	17,6	9,8
Vf3	8	5,8	4,4	4,2	10,8	9,6
Vf3	5,4	5,2	3,4	8,4	13,8	12,4
Vf4	4,6	4,8	11	8	13,6	11,2
Vf4	8,2	8	6,4	7,2	15,8	9,2
Vf4	6,6	8,2	8,8	14	15	11,4
Vf4	6,2	6,8	8,2	7,6	15,4	10,8
Vf4	3,2	4,4	6,2	9,8	18,2	13,2
Vf4	5,4	11	5,4	9,4	13,8	11,8

GRUPO B – Rugosidade –Ra (µm) Onde:

Vc₁= 5,9 m/s; Vc₂= 8,4 m/s; Vc₃= 10,9 m/s; Vc₄= 13,4 m/s.

GRUPO B						
Dados - Rugosidade – Ra (µm) com Vf = 5 m/min						
	Fresamento tangencial				Fresamento frontal	
	Discordante		Concordante			
	Favor	Contra	Favor	Contra	Perpendicular	Paralelo
Vc1	2,4	3,8	5,8	5,8	20,4	12,2
Vc1	6,8	5,2	4,6	6	22,8	11,6
Vc1	8,4	9,2	5,6	6,8	24,6	9,8
Vc1	8,2	9,6	7,6	7	20,6	10,2
Vc1	7,2	6	8,8	11,6	28	14
Vc1	7,2	8	4,2	6,6	26,8	12,4
Vc2	2,6	2,6	4,6	6,8	13,8	6,6
Vc2	3	5,6	7,2	7,8	11	7,8
Vc2	6,6	6,6	4	9,8	10,6	9,2
Vc2	5,8	5,8	4	5	12,2	7,6
Vc2	2,8	4	4,6	4,6	11,4	10,6
Vc2	3,8	4	3,6	5,2	14,2	7
Vc3	6,6	6	4	8	18,8	9
Vc3	3,8	9,4	7	8,4	14,6	9,2
Vc3	5	4,2	4,2	8,4	14,4	9,4
Vc3	3,4	5,4	6,8	8	12,4	8,4
Vc3	7	6,8	8	7,2	12,8	8,6
Vc3	3,4	4	5,4	11,2	19,2	10
Vc4	5	5,2	6,2	4,2	10,6	10,6
Vc4	5	6	3,4	8,8	13	12
Vc4	5,2	6,6	5,6	6,6	12,4	9,6
Vc4	5	7	3,2	4	9,4	14
Vc4	4,8	7,6	3,6	9,4	11,2	9,4
Vc4	6	6,2	3,8	7,8	13,2	10,6

8.1 ANÁLISES DE VARIÂNCIA DOS GRUPOS (ANOVA) E TESTE TUKEY

8.1.1 Grupo A – Vc= 10,9 m/s

Análise de variância

```
> summary(aov(lm(Rugosidade~VelocidadeAvanco+Sentido+VelocidadeAvanco*Sentido)))
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
VelocidadeAvanco	3	122.40	40.799	12.5717	3.334e-07 ***
Sentido	5	1349.60	269.920	83.1730	< 2.2e-16 ***
VelocidadeAvanco:Sentido	15	118.19	7.879	2.4278	0.004039 **
Residuals	120	389.43	3.245		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

1 observation deleted due to missingness

TUKEY

```
>
```

```
TukeyHSD(aov(lm(Rugosidade~VelocidadeAvanco+Sentido+VelocidadeAvanco*Sentido)))
```

Tukey multiple comparisons of means

95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = lm(Rugosidade ~ VelocidadeAvanco + Sentido + VelocidadeAvanco *

Sentido))

\$VelocidadeAvanco

	diff	lwr	upr	p adj
Vf2-Vf1	1.4055556	0.29927906	2.5118321	0.0066707
Vf3-Vf1	0.8055556	-0.30072094	1.9118321	0.2347489
Vf4-Vf1	2.5277778	1.42150128	3.6340543	0.0000002
Vf3-Vf2	-0.6000000	-1.70627649	0.5062765	0.4937178
Vf4-Vf2	1.1222222	0.01594573	2.2284987	0.0454217
Vf4-Vf3	1.7222222	0.61594573	2.8284987	0.0005118

\$Sentido

	diff	lwr	upr	p adj
Concordantecontra-Concordanteafavor	1.6833333	0.1771467	3.1895199	0.0190355
Discordanteafavor-Concordanteafavor	-0.1500000	-1.6561866	1.3561866	0.9997252
Discordantecontra-Concordanteafavor	0.4916667	-1.0145199	1.9978533	0.9337289
Topoparalelo-Concordanteafavor	3.7750000	2.2688134	5.2811866	0.0000000
Topoperpendicular-Concordanteafavor	8.5583333	7.0521467	10.0645199	0.0000000
Discordanteafavor-Concordantecontra	-1.8333333	-3.3395199	-0.3271467	0.0077254

Discordantecontra-Concordantecontra	-1.1916667	-2.6978533	0.3145199	0.2056726
Topoparalelo-Concordantecontra	2.0916667	0.5854801	3.5978533	0.0013912
Topoperpendicular-Concordantecontra	6.8750000	5.3688134	8.3811866	0.0000000
Discordantecontra-Discordanteafavor	0.6416667	-0.8645199	2.1478533	0.8193637
Topoparalelo-Discordanteafavor	3.9250000	2.4188134	5.4311866	0.0000000
Topoperpendicular-Discordanteafavor	8.7083333	7.2021467	10.2145199	0.0000000
Topoparalelo-Discordantecontra	3.2833333	1.7771467	4.7895199	0.0000001
Topoperpendicular-Discordantecontra	8.0666667	6.5604801	9.5728533	0.0000000
Topoperpendicular-Topoparalelo	4.7833333	3.2771467	6.2895199	0.0000000

8.1.2 Grupo B – Vf= 5 m/min

ANÁLISE DE VARIÂNCIA

```
> summary(aov(lm(Rugosidade~VelocidadeCorte+Sentido+VelocidadeCorte*Sentido)))
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
VelocidadeCorte	3	272.43	90.81	27.6559	1.149e-13 ***
Sentido	5	2008.02	401.60	122.3074	< 2.2e-16 ***
VelocidadeCorte:Sentido	15	416.28	27.75	8.4519	6.813e-13 ***
Residuals	120	394.03	3.28		

TUKEY

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```
> TukeyHSD(aov(lm(Rugosidade~VelocidadeCorte+Sentido+VelocidadeCorte*Sentido)))
```

Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = lm(Rugosidade ~ VelocidadeCorte + Sentido + VelocidadeCorte *

Sentido))

\$VelocidadeCorte

	diff	lwr	upr	p adj
Vc2-Vc1	-3.7055556	-4.8183371	-2.5927740	0.0000000
Vc3-Vc1	-2.1500000	-3.2627816	-1.0372184	0.0000101
Vc4-Vc1	-2.8777778	-3.9905594	-1.7649962	0.0000000
Vc3-Vc2	1.5555556	0.4427740	2.6683371	0.0022391
Vc4-Vc2	0.8277778	-0.2850038	1.9405594	0.2177822
Vc4-Vc3	-0.7277778	-1.8405594	0.3850038	0.3261492

\$Sentido

	diff	lwr	upr	p adj
Concordantecontra-Concordanteafavor	2.0500000	0.5349568	3.5650432	0.0020175
Discordanteafavor-Concordanteafavor	-0.0333333	-1.5483766	1.4817099	0.9999998

Discordantecontra-Concordanteafavor 0.79166667 -0.7233766 2.3067099 **0.6563612**
 Topoparalelo-Concordanteafavor 4.75000000 3.2349568 6.2650432 **0.0000000**
 Topoperpendicular-Concordanteafavor 10.52500000 9.0099568 12.0400432 **0.0000000**
 Discordanteafavor-Concordantecontra -2.08333333 -3.5983766 -0.5682901 **0.0016052**
 Discordantecontra-Concordantecontra -1.25833333 -2.7733766 0.2567099 **0.1626271**
 Topoparalelo-Concordantecontra 2.70000000 1.1849568 4.2150432 **0.0000144**
 Topoperpendicular-Concordantecontra 8.47500000 6.9599568 9.9900432 **0.0000000**
 Discordantecontra-Discordanteafavor 0.82500000 -0.6900432 2.3400432 **0.6151216**
 Topoparalelo-Discordanteafavor 4.78333333 3.2682901 6.2983766 **0.0000000**
 Topoperpendicular-Discordanteafavor 10.55833333 9.0432901 12.0733766 **0.0000000**
 Topoparalelo-Discordantecontra 3.95833333 2.4432901 5.4733766 **0.0000000**
 Topoperpendicular-Discordantecontra 9.73333333 8.2182901 11.2483766 **0.0000000**
 Topoperpendicular-Topoparalelo 5.77500000 4.2599568 7.2900432 **0.0000000**