



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA

MONITORAMENTO DAS FORÇAS E DESGASTE DA
FERRAMENTA DURANTE O FRESAMENTO
CONCORDANTE E DISCORDANTE DO AÇO ABNT 4140

MARCELO ADRIANO MARQUES DE ALMEIDA

Belo Horizonte
2019

MARCELO ADRIANO MARQUES DE ALMEIDA

**MONITORAMENTO DAS FORÇAS E DESGASTE DA
FERRAMENTA DURANTE O FRESAMENTO
CONCORDANTE E DISCORDANTE DO AÇO ABNT-4140**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara

**Belo Horizonte
2019**

A447m

Almeida, Marcelo Adriano Marques de.

Monitoramento das forças e desgaste da ferramenta durante o fresamento concordante e discordante do aço ABNT-4140. [recurso eletrônico] / Marcelo Adriano Marques de Almeida. – 2019.

1 recurso online (107 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Marcelo Araújo Câmara.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 97-107.

Bibliografia: f. 94-96.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Fresagem (Trabalhos em metal) - Teses. 3. Metais - Corte - Teses. 4. Usinagem - Teses. I. Câmara, Marcelo Araújo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel.: +55 31 3409.5145
E-mail: opgmec@de.nec.ufmg.br

**"MONITORAMENTO DAS FORÇAS E DESGASTE DA
FERRAMENTA DURANTE O FRESAMENTO CONCORDANTE E
DISCORDANTE DO AÇO ABNT-4140"**

MARCELO ADRIANO MARQUES DE ALMEIDA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Engenharia de Manufatura e Materiais".

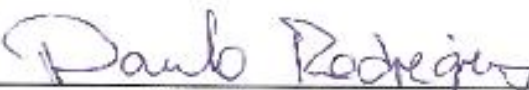
Dissertação aprovada no dia 17 de julho de 2019.

Por:



Prof. Marcelo Araújo Câmara

Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG



Prof. Paulo Cesar de Matos Rodrigues

Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG



Prof. Alexandre Mendes Abrao

Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Dedico esta pesquisa a minha esposa e filha.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara pelo companheirismo, paciência e dedicação a cada momento da orientação, a minha eterna gratidão.

Ao professor Dr. Alexandre Mendes Abrão com quem tive o primeiro contato na instituição e na sua valiosa colaboração neste trabalho.

Ao professor Dr. Marco Túlio pela atenção.

A Marina pela atenção e carinho que teve quando a precisei.

Ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal De Minas Gerais.

Ao CNPq e Capes que ajudaram esta pesquisa.

Ao centro universitário Newton Paiva pela disponibilização dos laboratórios de usinagem e ensaios mecânicos.

Aos colegas mestrandos, doutorandos do laboratório e sala de estudo pelo apoio e atenção dada sempre que precisei.

Ao meu caro amigo Anderson Júnior com sua sempre disponibilidade e boa vontade de ajudar, muito obrigado meu amigo.

A meus irmãos pelo apoio constante. Ao meu pai e minha mãe que mesmo de longe me guiaram para as atitudes corretas.

A minha amada esposa por estar ao meu lado em mais um desafio. E a minha querida filha que só por existir me fez motivado nesta caminhada.

Ao nosso Deus, que sem ele nada é possível...

Obrigado a todos que de uma forma ou de outra participaram deste sonho.

“Saiba que seu destino é traçado pelos seus próprios pensamentos, e não por alguma força que venha de fora. O seu pensamento é a planta concebida por um arquiteto para construir um edifício denominado prosperidade. Você deve tornar o seu pensamento mais elevado, mais belo e mais próspero.” .

Martin Luther King

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS DE ELEMENTOS E COMPOSTO QUÍMICOS	13
NOMECLATURA	14
RESUMO	16
ABSTRACT	17
1 INTRODUÇÃO.....	18
2 OBJETIVOS	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 Fresamento.....	20
3.1.1 Fresamento discordante e concordante	23
3.3 Ferramentas de corte de Aço Rápido	27
3.3.1 Fresa de topo aço rápido.....	28
3.4 Forças no fresamento	30
3.4.1 Determinação da força teórica de corte.....	31
3.4.2 Força de corte no movimento concordante e discordante	33
3.5 Acabamentos de superfícies na operação de fresamento.....	35
3.5.1 Efeitos dos parâmetros de corte sobre a rugosidade.	37
3.5.2 Medição da rugosidade superficial.....	39
3.6 Desgastes da ferramenta.	39
3.6.1 Desgaste da ferramenta no fresamento concordante e discordante.....	44
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
4.1 Materiais	47
4.1.1 Corpo de prova.....	47
4.1.2 Fresa de topo	49
4.2 Equipamentos.....	50
4.2.1 Forno elétrico	50
4.2.2 Durômetro	50
4.2.3 Centro de usinagem para preparação dos corpos de provas.....	51
4.2.4 Centro de usinagem para execução dos ensaios.....	52
4.2.5 Dinamômetro.....	52

4.2.6 Rugosímetro	53
4. 2.7 Análises do desgaste da ferramenta	53
4.3 Método	54
4.3.1 Fresamento concordante e discordante	55
4.3.2 Montagem do corpo de prova no dinamômetro	57
4.3.3 Parâmetros de corte utilizados nos ensaios	57
4.3.4 Aquisição de dados da força.....	58
4.3.5 Medição da rugosidade.....	61
4.4 Planejamento fatorial completo	62
4.5 Desgaste da ferramenta.....	63
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1 Rugosidade.....	64
5.2 Forças de usinagem.....	68
5.3 Desgaste da ferramenta.....	74
5.4. Tipo e mecanismo de desgaste.....	85
5.4.1 Desgaste abrasivo	85
5.4.2 Deformação plástica.....	88
6 CONCLUSÃO.....	91
6.1 Rugosidade.....	91
6.2 Forças durante o fresamento	91
6.3 Desgaste da ferramenta.....	91
6.3.1 Desgaste abrasivo	91
6.3.2 Deformação plástica.....	92
6.5 Conclusão geral.....	92
7 SUGESTÕES PARATRABALHOS FUTUROS.....	93
9 REFERÊNCIAS	94
ANEXO	97
Certificado de composição química referente ao material dos corpos de provas.....	97
APÊNDICE A – Resultado da Análise de Variância	98
APÊNDICE B – Resultado das medições de Ra [μm]	100
APENDICE C – DESENHO DO CORPO DE PROVA	101
APENDICE D – IMAGENS DO DESGASTE DA ARESTA DE CORTE PERIFÉRICA DA FRESA.....	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de fresamento frontal	22
Figura 2 - Fresamento discordante e concordante.....	24
Figura 3 - Movimento discordante e Movimento concordante	25
Figura 4- Elemento da cunha de corte de uma fresa frontal	29
Figura 5 - Componente da força de usinagem no fresamento.	31
Figura 6 - Componentes da força de corte atuando em uma aresta.	33
Figura 7 - Influência da velocidade de corte na força de corte para os movimentos discordante e concordante.....	33
Figura 8 - Influência da velocidade de avanço na força de corte para os movimentos discordante e concordante.	34
Figura 9 - Desvios na forma da superfície.....	35
Figura 10 - Fresa de facear de metal duro com aresta alisadora secundária e fresa de aço-rápido com superfície secundária de folga.	38
Figura 11 - Diagrama de espinha de peixe com os parâmetros que afetam a rugosidade da superfície.	38
Figura 12 - Incipais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.	42
Figura 13 - Desgaste da ferramenta.....	43
Figura 14 - Variação cíclica da temperatura no corte interrompido.....	45
Figura 15 - (a) Seção longitudinal e (b) Seção transversal (400x)	48
Figura 16 - Corpo de prova para dureza e microestrutura.	48
Figura 17 - (a) Corpo de prova utilizado no experimento e (b) dimensões do corpo de prova.	49
Figura 18 – a) Fresa de topo e b) Especificações	49
Figura 19 - Tratamento térmico dos corpos de prova.....	50
Figura 20 - Durômetro.....	51
Figura 21 - Centro de usinagem utilizado para preparação dos corpos de provas.	51
Figura 22 - Centro de usinagem utilizado para os testes.	52
Figura 23 - Montagem do corpo de prova no dinamômetro (a) e placa de aquisição de sinais(b).	52
Figura 24 - Rugosímetro digital	53
Figura 25 - Fluxograma do trabalho.	54
Figura 26 - Desenho esquemático do fresamento nos ensaios.	55
Figura 27 - Desenho esquemático da sequencia de fresamento para desgaste da ferramenta. .	56
Figura 28 - Fixação do corpo de prova no dinamômetro.	57
Figura 29 - Fresamento durante os ensaios.	58
Figura 30 - Montagem do dinamometro	59
Figura 31 - Sentido da força durante o fresamento.	60
Figura 32 - Cargas de 10 e 20N.....	60
Figura 33 - Esquema de montagem do dinamômetro.....	61
Figura 34 - Medição da rugosidade.	61
Figura 35 - Gráfico de probabilidade para rugosidade média	64
Figura 36 - a) análise dos resíduos versus ordem, b) análise dos resíduos versus ajustes.	65

Figura 37 – Gráfico de Interação para rugosidade Ra.	66
Figura 38 - Gráfico com as medias de rugosidade.	67
Figura 39- Gráfico das forças de fresamento em função do comprimento usinado nos intervalo de 80, 400,1200 e 1600 mm entre movimento discordante e concordante.	69
Figura 40 - Gráficos das forças de fresamento em função do comprimento usinado nos intervalo de 80, 400,1200 e 1600 mm entre movimento discordante e concordante.	70
Figura 41 – Gráficos das forças de fresamento em função do comprimento usinado nos intervalo de 80, 400,1200 e 1600 mm entre movimento discordante e concordante na força Fx.	71
Figura 42 – Gráficos da força de avanço Fx de fresamento em função do comprimento usinado e avanços dos movimentos discordante e concordante.	72
Figura 43 - Gráfico das Forças de apoio Fy de fresamento em função do comprimento usinado e avanços dos movimentos discordante e concordante.	73
Figura 44 - Medição da aresta nova.....	75
Figura 45 - Medição do desgaste da aresta de corte.	76
Figura 46 - Medição do desgaste da aresta de corte.	78
Figura 47 - Medição do desgaste da aresta de corte.	80
Figura 48 - Gráfico do desgaste por avanços ocorridos nos dois movimentos.	81
Figura 49 - Tempo de impacto da aresta de corte no movimento concordante e discordante..	82
Figura 50 - Desgaste da ferramenta e distancia percorrida.	83
Figura 51 – Desenho esquemático da operação de fresamento com fresa cilíndrica com e sem rebaixo.	84
Figura 52 - Desgaste da ferramenta no movimento concordante.	85
Figura 53 - Desgaste da ferramenta no movimento concordante.	86
Figura 54 - Desgaste da ferramenta no movimento concordante.	87
Figura 55 - Desgaste da ferramenta no movimento discordante.	88
Figura 56 - Desgaste da ferramenta no movimento discordante.	89
Figura 57 - Desgaste da ferramenta no movimento discordante.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química da fresa de Aço Rápido AISI M2.	29
Tabela 2 - Composição química do material utilizado nos testes, aço ABNT 4140.	47
Tabela 3 - Parâmetros de corte utilizados.....	57
Tabela 4 - Condições testadas.	62
Tabela 5 - Análise de variância para os dados da rugosidade	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
AISI	Instituto Americano do ferro e do Aço
APC	Aresta postiça de corte.
DIN	Instituto Alemão de Normalização
HSS	Aço rápido.
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais.

LISTA DE SÍMBOLOS DE ELEMENTOS E COMPOSTO QUÍMICOS

ALCrN	Nitreto de cromo-alumínio
C	Carbono
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
Si	Silício
TiCN	Carbonitreto de titânio
TiN	Nitreto de titânio
TiNAI	Nitreto de titânio-alumínio
V	Vanádio
W	Tungstênio

NOMECLATURA

Letras latinas

A	Área	[mm ²]
a_c	Penetração de trabalho	[mm]
a_p	Profundidade de usinagem	[mm]
D_c	Diâmetro do cortador	[mm]
f	Avanço de corte	[mm/rev]
f_z	Avanço por dente	[mm/dente]
F_x	Força de avanço	[N]
F_y	Força de apoio	[N]
F_z	Força passiva	[N]
F_c	Força de corte	[N]
F_e	Força efetiva de corte	[N]
F_{TR}	Força ativa	[N]
F_u	Força de usinagem	[N]
h_m	Espessura média de corte no fresamento	[mm]
h_{max}	Espessura máxima do cavaco	[mm]
hd	Espessura do cavaco	[mm]
HRc	Dureza Rockwell C	[-]
K_s	Pressão específica de corte	[N]
KT	Profundidade da cratera	[mm]
Ra	Desvio médio aritmético	[μ m]
VB_B	Desgaste de flanco médio	[mm]
VB_{MAX}	Desgaste de flanco máximo	[mm]
VB_c	Desgaste de ponta	[mm]
VB_N	Desgaste de entalhe	[mm]

,

Letras gregas

χ_r	Ângulo de posição	[graus]
ϕ	Ângulo de contato da aresta	[graus]
r_ϵ	Raio de ponta da ferramenta	[mm]

RESUMO

A operação de usinagem por fresamento é amplamente utilizada na indústria mecânica de transformação pela sua capacidade de usinar peças dos mais diversos perfis e garantindo boa produtividade no que se refere à remoção de material. Entretanto, a operação de usinagem por fresamento pode ocorrer de duas maneiras no que se refere ao sentido de corte, uma no sentido concordante e outra no sentido discordante. A programação correta deste sentido de corte para cada processo específico se torna muito relevante na obtenção de bons resultados, com influência direta no resultado final como rugosidade, temperatura, desgaste da ferramenta e conseqüentemente no custo da produção. Este trabalho se propõe ao estudo da influência do sentido de corte (concordante e discordante) durante o fresamento do aço ABNT 4140. Para tanto, foram utilizados fresas de aço rápido de 6 mm de diâmetro e varia-se o avanço por dente e mantendo a velocidade de corte, profundidade de usinagem e penetração de trabalho constantes durante os ensaios, obtendo como resposta a rugosidade (desvio médio aritmético), força de corte e desgaste da ferramenta. Para o desvio médio aritmético, durante o avanço de corte F_z de 0,018 mm maiores valores foram encontrados no sentido concordante, para o avanço de corte F_z 0,03mm/aresta e 0,04 mm/aresta maiores valores foram encontrados no sentido discordante. As forças geradas em todos os eixos cresceram durante a usinagem devido ao desgaste da ferramenta. Maiores forças foram encontradas no sentido concordante na força de avanço quando utilizado avanço de 0,018mm/aresta. Os resultados mostraram que o desgaste da ferramenta foi mais severo para os avanços menores e quando utilizado o sentido concordante. Foram identificado o mecanismo de desgaste por abrasão, deformação plástica e adesão nas ferramentas, sendo o desgaste por abrasão mais evidente no movimento concordante. Deformação plástica no movimento discordante e uma possível adesão foram encontradas em todos os movimentos.

Palavras chaves: fresamento; sentido de corte; desvio médio aritmético; força de corte; desgaste da ferramenta.

ABSTRACT

The machining operation by milling is widely used in the mechanical processing industries for its ability to machine parts of the most diverse profiles and ensuring good productivity when it comes to the removal of material. However, the milling operation can occur in two ways with respect to the cutting direction, one in the down-milling and up-milling cutting direction. The correct programming of this sense of cut for each specific process becomes very relevant when it comes to obtaining good results. This process influence on the final result as average roughness, temperature, tool wear and consequently on the cost of production. On this purpose, this study of the down-milling and up-milling cutting direction during milling of ABNT 4140 steel. Thus, high speed steel milling was used, with 6 mm diameter. The per tooth was varied, the cutting speed and cutting depth were maintained constant during the test. Three characteristics were evaluated: average surface roughness, cutting force and tool wear. In relation the average roughness, higher values were found to parameters of the F_z 0,018 mm in moviment down-milling. Higher values of average roughness were found to parameters of the F_z 0,03 and 0,04 mm in moviment up-milling. The cutting force were higher due to tool wear. Higher cutting force were found in the moviment down-milling and feed per tooth of 0,018mm. The results showed that the wear of the tool was more severe for the smaller feed and when using the down-milling direction. The wear by abrasion, plastic deformation and adhesion in the tools was identified, being the wear by abrasion more evident in the down-milling moviment. Plastic deformation in the up-milling moviment and a possible adhesion were found in both moviments.

Key words: milling; cutting direction; average roughness; cutting force; tool wear.

1 INTRODUÇÃO

O cenário atual apresenta um constante desafio com a crescente necessidade de elaborar processos mais otimizados e atendendo as exigências da qualidade e com o menor custo possível de produção. Para Machado et al. (2015), as condições de corte ideais são aquelas capazes de produzir peças dentro de especificações de forma, tamanho e acabamento ao menor custo possível. Segundo Ferraresi (2000), o fresamento consiste no processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfície qualquer com auxílio de ferramenta multicortante. O fresamento é de suma importância dentro da indústria metalmeccânica de transformação por ser um processo que possibilita a usinagem de peças de perfis complexos e garantido boa remoção de material, com isso é amplamente presente nas indústrias automotivas, aeronáuticas, mineração, naval, petroleira entre outras. Porém este processo apresenta particularidades, tais como; corte intermitente, variação cíclica de temperatura na aresta cortante e variações de esforços mecânicos que devem ser consideradas no momento da programação dos parâmetros de usinagem. Este trabalho discorre sobre as diferenças do fresamento frontal assimétrico considerando o sentido de corte. Este tipo de fresamento pode ocorrer de duas maneiras: no sentido discordante e no sentido concordante. Para Diniz et al. (2013) o fresamento discordante ocorre com crescimento progressivo da espessura de corte de zero até um valor máximo. Para o concordante a aresta de corte ao penetrar na peça faz com que a espessura de corte seja máxima e prossiga reduzindo até atingir um valor igual a zero. Dentre várias outras, essa é a principal diferença do movimento discordante e concordante que atuam fortemente nos componentes da usinagem resultando em respostas bem diferentes quando comparando os dois movimentos. A aplicabilidade do conhecimento destas características representa um aumento na produção com a redução do desgaste da ferramenta evitando assim possíveis vibrações garantindo melhores acabamentos e precisão dimensional. O presente trabalho tem como objetivo estudar os movimentos concordante e discordante e suas influências no desvio médio aritmético, força de corte e desgaste da ferramenta. Durante o fresamento do aço ABNT 4140, os testes foram avaliados com fresamento de topo frontal assimétrico utilizando a_p e v_c constante e variando o avanço por dente. Para avaliar o desvio médio aritmético, força de usinagem e desgaste foram utilizados um rugosímetro digital, dinamômetro e microscópio eletrônico de varredura (MEV), respectivamente.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar a influência do sentido concordante e discordante sobre fresamento frontal assimétrico do aço ABNT 4140 normalizado e suas diferenças de comportamento durante e ao final da usinagem.

2.1 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, este trabalho propõe a comparação dos resultados obtidos entre os dois movimentos para conhecer a variabilidade levando em conta os seguintes fatores:

- Estudar as variações de valores de desvio médio aritmético nos dois sentidos por meio de medição com rugosímetro digital
- Avaliar a força de corte nos três eixos durante a usinagem utilizando dinamômetro.
- Avaliar o desgaste da ferramenta e identificar os mecanismos de desgaste por meio do MEV e EDS .

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os aspectos mais importantes referente a operação de fresamento, como características sobre a operação de fresamento, movimento concordante e discordante, ferramentas de aço rápido, força no fresamento, desvio médio aritmético e desgaste da ferramenta.

3.1 Fresamento.

O processo de usinagem por fresamento é largamente utilizado na indústria metalmeccânica de transformação devido a sua versatilidade e ótimo desempenho na usinagem de peças dos mais diferentes perfis e garantindo ótimas taxas na remoção de material. A operação de fresamento se destaca pela sua complexidade e características exclusivas quando comparados com outras operações. Pode-se citar as principais diferenças como:

- o corte é interrompido, que é resultado da alternância com que as arestas de corte tocam na peça.
- cavaco tipos lascas ou pedaços.
- variação cíclica da temperatura.

Em relação à posição da fresa com a peça, o fresamento pode ocorrer de duas formas, do tipo tangencial e frontal. De acordo com Diniz et al. (2013) eles possuem as seguintes características:

Fresamento tangencial: os dentes ativos estão na superfície cilíndrica da ferramenta e o eixo da fresa é paralelo à superfície que está sendo gerada. As fresa são chamadas de fresas cilíndricas ou tangenciais.

Fresamento frontal: operação nas quais os dentes ativos da fresa estão na superfície frontal da ferramenta, o eixo é perpendicular na superfície gerada. As fresas são chamadas de fresas frontais ou de topo.

Existem algumas vantagens do fresamento frontal quando comparados ao tangencial, na qual o fresamento de topo é o foco de estudo deste trabalho, sendo assim, METALS HANDBOOK, volume 16(1989) cita algumas dessas vantagens sendo:

- melhor relação de remoção de material por potência consumida.
- maior rigidez da fresa.
- força de corte melhor distribuída.
- maior eficiência de corte e um menor tempo requerido para mudança de ferramenta.

O fresamento frontal pode ser simétrico ou assimétrico. O fresamento simétrico frontal ocorre quando o deslocamento do eixo da fresa se faz sobre o eixo de simetria da peça em usinagem, ou seja, este posicionamento resulta no menor contato de cada aresta com a peça, portanto aumenta a vida da ferramenta. Este fresamento pode ser classificado em fresamento de rasgo e fresamento comum para facear, ocorrendo diferença na formação do cavaco entre os dois. No fresamento de rasgo onde $a_e = D$, ou seja, $\phi = 180^\circ$ e $h_{D \max} = f_z \cdot \text{sen} \cdot x_r$ (DINIZ *et al.*, 2013), a espessura de corte cresce iniciando de valor zero até um valor máximo e depois volta a zero, formando então um cavaco do tipo vírgula com as extremidade iniciando em zero, no centro do cavaco com espessura máxima e finalizando em zero. Para fresamento comum de facear de acordo com Diniz et al. (2013) o $a_e < D$, onde $\text{sen}(\phi/2) = (a_e / h_{D \min})$, diferente de zero e $h_{D \max} = f_z \cdot \text{sen} \cdot x_r$ a espessura de corte não se inicia em zero e cresce de um determinado valor na entrada do dente na peça até um valor máximo e depois volta ao valor inicial, formando um cavaco tipo vírgula com as extremidades já com um valor determinado não iniciando a partir do zero e atingindo espessura máxima no centro e depois voltando ao valor inicial. Na figuras 1 pode ser observada a variação da espessura do cavaco de acordo com o tipo de fresamento.

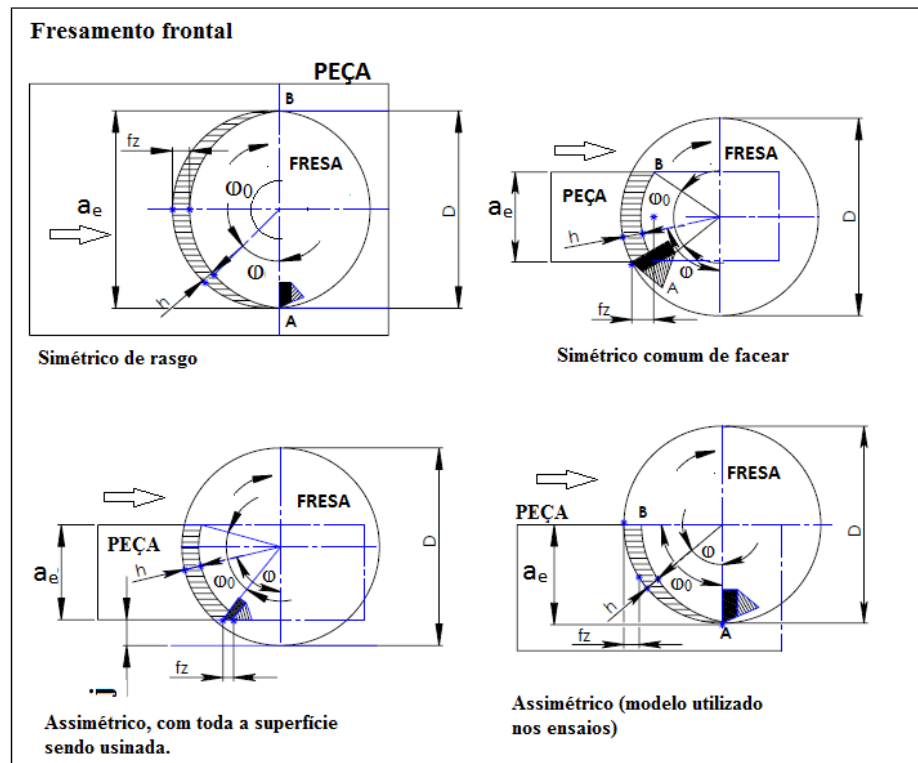


Figura 1 - Tipos de fresamento frontal

Fonte: Diniz et al. (2013) adaptado.

Para a operação de fresamento frontal assimétrico com fresas de facear o corte não se dá sobre o eixo de simetria da peça em usinagem quando toda superfície esta sendo usinada, temos $a_e < D$, onde $h_{D \min}$, diferente de zero e de acordo com equação 01 $h_{D \max} = f_z \cdot \text{sen} \cdot x_r$ (DINIZ *et al.* , 2013), a espessura de corte se inicia com valores diferentes de zero até um valor máximo. Neste caso quando ocorre no movimento concordante a maior parte do corte tem a espessura decrescente. Formando assim um cavaco com espessura inicial de valor diferente de zero até um valor máximo. Quando ocorre no discordante a maior parte do corte tem a espessura crescente, formando um cavaco com espessura inicial diferente de zero até um valor máximo. Este movimento também pode ocorrer na usinagem de rebaixos no qual foram feitos os testes, para este caso quando está no movimento concordante se inicia com valor espessura diferente de zero e descrese até zero, no discordante forma cavaco com espessura inicial de zero e cresce até um valor final, de acordo com Diniz et al. (2013) temos, $a_e > D/2$ tem-se $h_{D \max} = f_z \cdot \text{sen} \cdot x_r$ quando $a_e > D/2$ tem-se $h_{D \max} = f_z \cdot \text{sen} x_r \cdot \text{sen} \phi_0$. Assim o movimento assimétrico se torna vantajoso em relação ao simétrico quando o diâmetro da fresa é grande em relação a largura da peça, por se ter um maior número de dentes simultaneamente

no corte, obtendo assim menores esforços de cortes por aresta com isso um corte mais suave e menos vibração.

3.1.1 Fresamento discordante e concordante

Com relação ao sentido de corte, o fresamento frontal pode ter movimentos discordantes e concordantes. Este sentido de corte no fresamento tem grande influência no processo de usinagem atuando diretamente sobre acabamento, forças envolvidas, temperaturas, desgaste da ferramenta e relação direta com a folga da máquina (DIB et al.,2015). A definição correta de quais movimentos deve-se utilizar durante a usinagem interfere diretamente no resultado final do processo. Pesquisa realizada por Bouzakis et al. (2003) mostrou que a cinemática do processo de fresamento discordante e concordante afeta significativamente a distribuição de tensão na ferramenta e o desempenho da operação de fresamento. Para Diniz (2013) o fresamento discordante ocorre da seguinte maneira o ângulo de contato (ϕ) cresce de zero a um valor máximo (o sentido de avanço é contrário ao do rotatório da fresa), neste movimento a espessura de corte H_d aumenta progressivamente de zero até um valor máximo, este movimento causa muito atrito entre a ferramenta e peça gerando aumento da temperatura e contribuindo para desgaste prematuro da ferramenta, aumentando vibrações indesejáveis que prejudicam o acabamento e comprometendo o dimensional da peça usinada. Antes de iniciar a remoção do material, ele é compactado pela ferramenta, tendo como resultado o aumento da temperatura na zona de corte que leva a intensificar todas as formas de desgaste da ferramenta (Josic et al.,2012),. Resultados obtidos por meio de um estudo experimental realizado por Li et al.(2006), mostraram que a propagação de desgaste de flanco na operação de fresamento discordante é mais rápida quando comparado com o fresamento concordante utilizando ferramenta de metal duro na usinagem de Inconel 718, o desgaste medido no flanco foi de 0,51 para o discordante e 0,38 para o concordante. Para o movimento concordante Diniz et al. (2013) relata que o ângulo de contato (ϕ) começa em um valor máximo e decresce até zero (o sentido do movimento de avanço é o mesmo do rotatório da fresa), Neste movimento a espessura de corte se inicia com H_d máximo e depois decresce até um valor zero, para este movimento a geração de calor é menor em relação ao discordante, devido ao menor atrito que contribui para o aumento de vida da ferramenta e contribuindo para um melhor acabamento. Como não há forte atrito da

ferramenta com material da peça, a superfície usinada tem melhor qualidade, e não há impactos negativos no desgaste da ferramenta, consequentemente no desgaste do flanco (Josic et al.,2012). A figura numero 2 apresenta o angulo de contato da aresta de corte da fresa com material nos dois movimentos.

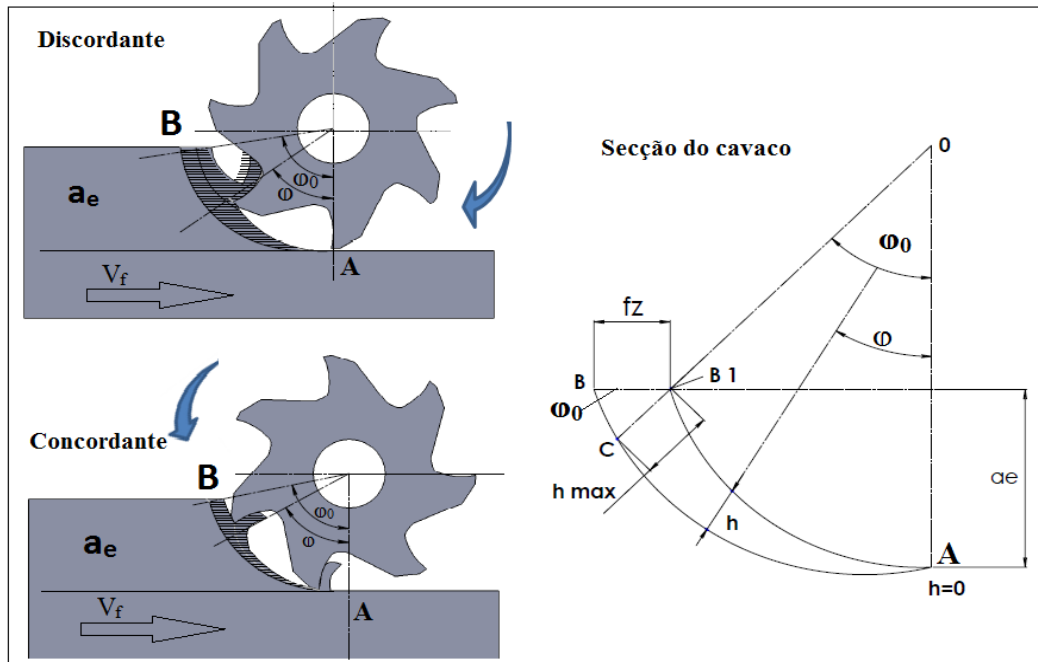


Figura 2 - Fresamento discordante e concordante.

Fonte: Diniz; et al (2013), adaptado.

Ao fresar no sentido discordante a aresta de corte fricciona a peça antes de cortar promovendo grande atrito, com isso se forma um cavaco fino que absorve pouco calor contribuindo para aumento da temperatura. Essas condições contribuem para o encruamento da superfície da peça que faz com a aresta de corte quente encontre uma camada endurecida o que reduz a vida da ferramenta. Também neste caso os cavacos ficam mais suscetíveis a se depositarem na frente da fresa podendo ser novamente atingidos pela fresa o que prejudica o acabamento da superfície. Mas ele é o mais indicado no fresamento de superfícies fundidas ou forjadas, devido ao fato deste movimento começar de baixo para cima e assim não vai de encontro com camada altamente endurecida e abrasiva existente na superfície destas peças, ao contrário do concordante que vai de cima para baixo e encontra esta camada que pode causar lascamento e desgaste prematuro da ferramenta, Hadi et al. (2013) afirma que durante a entrada da ferramenta na peça há grande força de impacto podendo causar lascamento devido à camada

de endurecimento na superfície na peça e isso irá promover a formação de desgaste de entalhe. Em máquinas manuais que operam com relativa folga o movimento discordante pode ser indicado, porque as forças atuantes na usinagem tendem a atuar contrárias ao movimento de avanço atenuando a folga. No sentido concordante a potência exigida da máquina é menor, os cavacos depositam atrás da fresa minimizando a chance da aresta se chocar se chocar contra a fresa contribuindo também para bom acabamento da superfície e a vida da ferramenta. O mesmo critério usado no movimento discordante em relação à folga da máquina também se adequa ao concordante, porque caso a máquina possua folga e como no movimento concordante o sentido das velocidades (de corte e avanço) são os mesmos, tende a puxar essa folga, o que contribui para aumenta-la causando grandes vibrações na usinagem, o que torna este movimento mais indicado para máquinas que trabalham sem folgas como máquinas comandadas por computador (CNC). Na usinagem do AISI-4140 feitos por Josic et al.(2012), foi analisado a influencia da velocidade de corte, avanço por aresta, a_e e a_p no desgaste de flanco. Os resultados mostraram que o processo de fresamento concordante executado em máquina-ferramenta CNC é mais eficaz do que o fresamento discordante. Na figura 3 apresentado por Josic (et al 2012) o movimento discordante e concordante durante o fresamento.

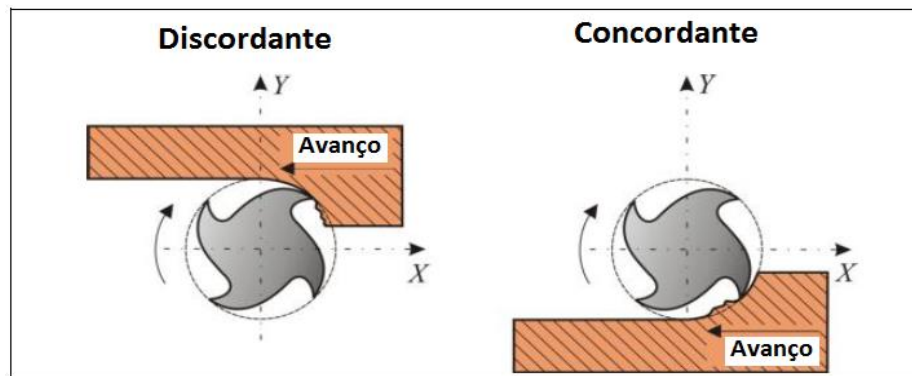


Figura 3 - Movimento discordante e Movimento concordante

Fonte: Josic et al. (2012).

O tipo de movimento a ser indicado para determinada usinagem depende das condições gerais envolvidas, portanto afirmar que um movimento é melhor do que outro fica muito subjetivo a essa questão. Deve-se avaliar o processo como um todo e considerar todas as variáveis possíveis. Assim pode-se definir algumas características que leva à melhor escolha:

- tipo de máquina que irá executar a usinagem se for máquina convencional (com relativa folga) ou CNC (sem folga). Esta escolha terá consequências diretas nos resultados final da usinagem.
- o tipo de ferramenta, ferramentas com pouca resistência ao desgaste não são indicados para o movimento discordante.
- o custo da ferramenta, ferramentas com maior resistência ao desgaste tem maior valor, portanto na escolha do movimento deve-se levar em conta este desgaste.
- acabamento final pretendido da peça deve ser considerado, porque este acabamento dependerá do tipo de movimento utilizado.

Assim pode-se citar algumas vantagens de cada movimento. Metals Handbook, volume 16 (1989) descreve essas vantagens.

Vantagens do fresamento concordante em relação ao discordante:

- dispositivos de fixação são mais simples, porque a força de fresamento tende a ser descendente.
- aresta com ângulos de inclinação podem ser altos, reduzindo a potência requerida.
- os cavacos ficam menos propensos a serem arrastados pelos dentes da fresa, reduzindo assim a possibilidade de prejudicar o acabamento da peça.
- o descarte do cavaco fica facilitado, pois ele fica acumulado atrás da ferramenta e não na frente.
- os desgastes da ferramenta são menores devido o corte se iniciar com espessura total no início do corte, reduzindo assim o atrito.
- geralmente os acabamentos são melhores devido ao atrito inicial do corte não existir.

Vantagens do fresamento discordante em relação ao concordante:

- menor impacto no início do corte, por se iniciar com zero espessura do cavaco se tornando assim mais suave a penetração da ferramenta no início do corte.
- a direção da força de usinagem compensa alguma folga existente no sentido de avanço da máquina, contribuindo para o bom acabamento.
- no fresamento de superfície em que a profundidade de corte varia muito.
- é mais indicado para o fresamento de peças fundidas ou forjadas com superfícies muito rugosas devido a areia ou incrustações.

3.3 Ferramentas de corte de aço rápido

Maior dureza e resistência ao desgaste são requisitos iniciais para que um material seja utilizado na fabricação de ferramenta de corte. Não basta, no entanto, que essas propriedades ocorram em temperatura ambiente, pois durante a usinagem são atingidas temperaturas muito mais elevadas (SANTOS E SALLES, 2007). No mundo da usinagem esse foi um conceito sempre em movimento, com a procura de materiais para ferramentas com maior dureza e que resistia a altas temperaturas, surgindo assim vários materiais para ferramentas de cortes dos mais diversos tipos, entre elas estão as de aços carbonos, aços-Rápidos, ligas fundidas, Metal Duro, Cermets, cerâmicas e Diamantes. Em 1898, Frederick W. Taylor e J. Maunsel White obtiveram, através de tratamento térmico e composição química, um aço que apresentava dureza a quente superior às dos empregados até então. Este foi o primeiro grande avanço em termos de materiais para ferramentas de corte, quando foi possível usinar com velocidade de corte dez vezes maior do que tinham conseguindo anteriormente, isso foi um grande avanço, possibilitando o aumento da produtividade. Com isso veio o nome de aço de velocidade rápida ficando conhecido mais tarde como aço rápido. O aço rápido é uma ferramenta de alta liga de tungstênio, molibdênio, cromo, vanádio, cobalto e nióbio. Os aço rápido podem ser fabricados por processo de fundição e laminação, metalurgia do pó ou sinterização. É amplamente utilizado nas operações de usinagem em geral como torneamento, fresamento, furação, aplainamento, inclusive em máquinas comandadas por computador (CNC), entre outras. Nos dias atuais são largamente utilizados devido a sua ótima tenacidade, elevada resistência ao desgaste, elevada dureza a quente e tendo ainda um custo menor quando comparados com outras ferramentas como a de metal duro, cerâmicas e diamantes. Aços rápidos são muito utilizados em fresas, brocas, escareadores, alargadores, brochas e ferramentas manuais para rosqueamento como machos e cossinetes. Os aço rápido têm como principal característica a resistência ao desgaste e tenacidade. Ferraresi (2000) define essas características da seguinte forma:

- dureza a quente é a capacidade de resistir ao amaciamento a temperaturas elevadas.
- resistência ao desgaste é a capacidade da seção da ferramenta que está em contato com a peça sob usinagem de suportar abrasão.

- Tenacidade, ou seja, capacidade de se deformar plasticamente quando submetido a elevada taxa de impacto.

No aço-rápido a elevação da temperatura provoca a transformação de austenita retida em martensita e a precipitação de carbonetos, fenômenos que resultam no aumento da dureza, essa combinação do endurecimento secundário e o revestimento de martensita resultam na manutenção da dureza até temperatura na faixa de 600° C (SANTOS E SALES,2007).

Klocke (2011) conclui que devido a isso e sua usinabilidade, eles continuam a ter uma ampla gama de aplicações, especialmente para ferramentas com arestas de corte e pequenos ângulos de cunha, tais como ferramentas de brochar, brocas helicoidais, corte de roscas ferramentas, alargadores, fresas e ferramentas de torneamento para usinagem de canais e cortes operações, bem como para acabamento.

3.3.1 Fresa de topo aço rápido.

Fresas de aço rápido são muito utilizadas na usinagem geral dos aços devidos as suas versatilidades e um baixo custo quando comparados com outros materiais. Fresas de topos são padronizadas pela norma DIN 844, que constitui de 2 a 10 arestas cortantes variando de acordo com seu diâmetro. São utilizadas principalmente em usinagem planas de superfície, canais, rasgos em geral, rebaxos, cavidades e podem ser utilizadas tanto para o desbaste ou acabamento. A figura 04 apresenta os elementos da fresa de topo.

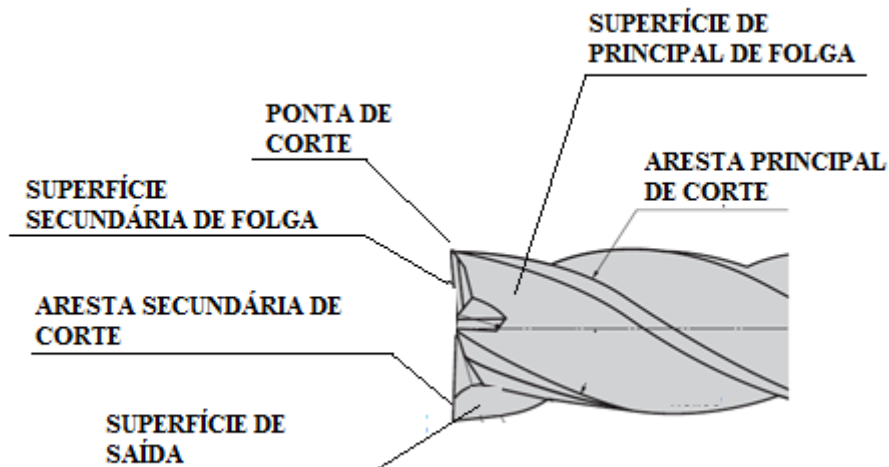
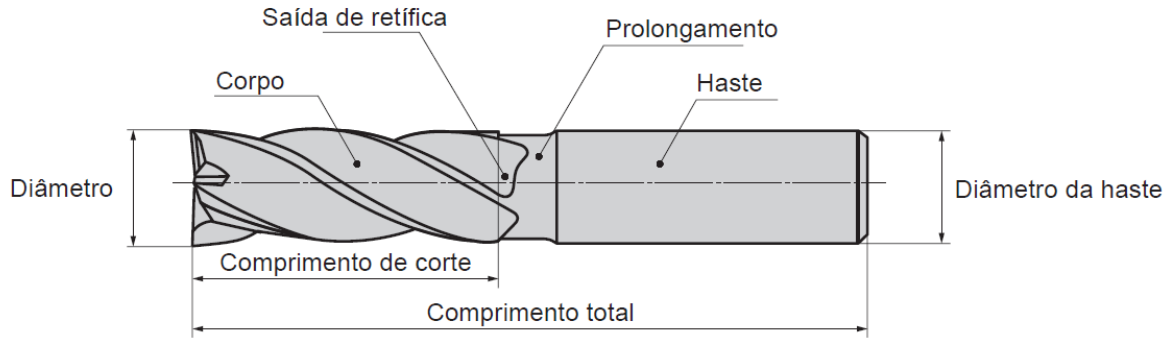


Figura 4- Elemento da cunha de corte de uma fresa frontal

Fonte: MACHADO et al (2015) adaptado).

O aço rápido tem várias classes composta da liga de Molibdênio e Tungstênio que confere alta tenacidade, alta resistência ao desgaste e ótimas propriedades de cortes.

A seguir tabela 01 mostra composição química da fresa aço rápido AISI M2 utilizada neste trabalho.

Tabela 1 - Composição química da fresa de Aço Rápido AISI M2.

Classe 650 (tipos ao W Mo)										
CLASSE	AISI	C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Co	Outros
650	M2	0,80/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	1,70/2,10	6,00/6,50	4,75/5,25	-	-
651	M3(tipo 1)	1,00/1,10	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	2,40/2,55	6,00/6,25	5,70/6,25	-	-
652	M3(tipo 2)	1,10/1,20	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	3,00/3,30	5,70/6,25	5,00/6,25	-	-
653	M4	1,25/1,30	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,50	3,75/4,25	5,00/6,25	4,50/4,75	-	-
654		0,80/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,50	1,35/1,65	6,00/6,50	4,30/4,70	-	1.1/1,40 Nb

Fonte: MACHADO et al (2015) adaptado.

3.4 Forças no fresamento

Nos processos de usinagem o entendimento das forças envolvidas se torna um fator primordial no monitoramento do processo com destaque na temperatura e desgaste da ferramenta, definindo índice de usinabilidade para os materiais, além de determinar a potencia de corte requerida permitindo assim o dimensionamento do motor.

De acordo com Trent e Wright (2000) o conhecimento da força de corte pode auxiliar a estimar a potência requerida para o projeto da máquina operatriz, o projeto do suporte de fixação da ferramenta e a rigidez adequada da máquina. A magnitude e direção da força de corte influencia várias condições no trabalho, na máquina, ferramentas, precisão da usinagem e potencia consumida (ZOREV, 1966). A variação dos componentes da força de corte no fresamento pode ser atribuído a uma série de fatores possíveis, como o desenvolvimento do desgaste da ferramenta, a superfície usinada que endurece o material por encruamento, a mudança de temperatura na interface ferramenta-peça (Li et al. 2006). Para a operação de fresamento o estudo se torna ainda mais importante devido a complexidade, que acontece de três modos simultâneos nos eixos X, Y e Z da máquina. A principal característica das forças no processo de fresamento é o fato destas serem alternadas, em função da ação de cada aresta de corte quando toca a peça (WEINGAERTNER et al 2006). De acordo com Ferraresi (2000) a componente da força de usinagem num plano ou direção qualquer é obtida mediante a projeção da força de usinagem P_u sobre esse plano ou direção, isto é, mediante uma decomposição ortogonal. Na figura 5 Ferraresi (2000) apresenta os componentes das forças no fresamento.

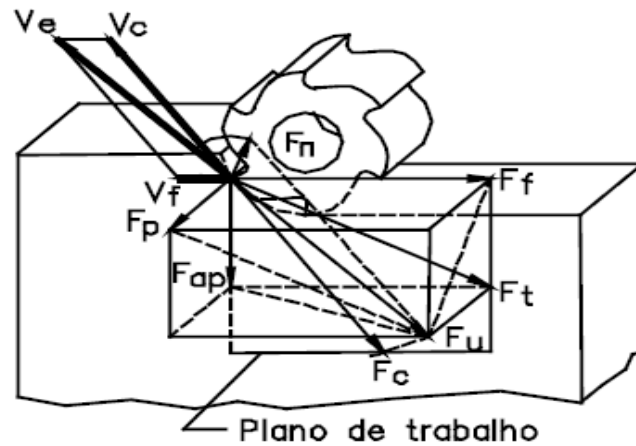


Figura 5 - Componente da força de usinagem no fresamento.

Fonte: Ferraresi (2000).

Ferraresi (2000) define a componente da força de usinagem da seguinte maneira:

- força ativa (F_t): A força ativa é a projeção da força de usinagem F_u sobre o plano de trabalho.
- força de corte (F_c): A força de corte (também conhecida de força principal de corte) é a projeção da força de usinagem F_u sobre a direção de corte (dada pela velocidade de corte).
- força de avanço (F_a): A força de avanço é a projeção da força de usinagem P_u sobre a direção de avanço.
- força de apoio F_{ap} : A Força de apoio é a projeção da força de usinagem P_u sobre a direção perpendicular á direção de avanço, situada no plano de trabalho.
- força efetiva de corte (F_e): A força efetiva de corte é a projeção da força de usinagem P_u sobre a direção efetiva de corte.
- força passiva P_p : A força passiva (também conhecida por força de profundidade) é a projeção da força de usinagem F_u sobre uma perpendicular ao plano de trabalho.

3.4.1 Determinação da força teórica de corte

A determinação teórica do ângulo do plano de cisalhamento permite a projeção da força (F_u) nas diversas direções de interesse. Sua previsão permite prever a potencia de corte

ou esforços na máquina ferramenta. Pesquisadores no início do século XX constataram que os componentes da força variam de acordo com seção do cavaco, especialmente a força de corte (F_c) a principal força utilizada para dimensionamento do motor da máquina-ferramenta. Assim foi proposta a primeira equação para determinar a força teórica de corte.

$$F_c = K_s \cdot A$$

Onde

K_s = pressão específica de corte

A = área de seção de corte ($f \cdot \text{sen } \chi_r$)

Para Machado et al. (2015), a pressão específica de corte é determinada medindo-se a força necessária para remover uma área de corte equivalente a 1mm^2 .

A pressão específica não está apenas relacionada com característica do material, similar a tensão de ruptura. Machado et al. (2015) define outros fatores influentes na pressão específica de corte.

- Material da peça.
- Material e geometria da ferramenta.
- Área de seção de corte
- Velocidade de corte.
- Condição de lubrificação e refrigeração.
- Desgaste da ferramenta.

3.4.2 Força de corte no sentido concordante e discordante

Na figura 6 podem ser observados as forças atuantes em uma aresta de corte nos dois sentidos de corte (discordante e concordante) durante o fresamento.

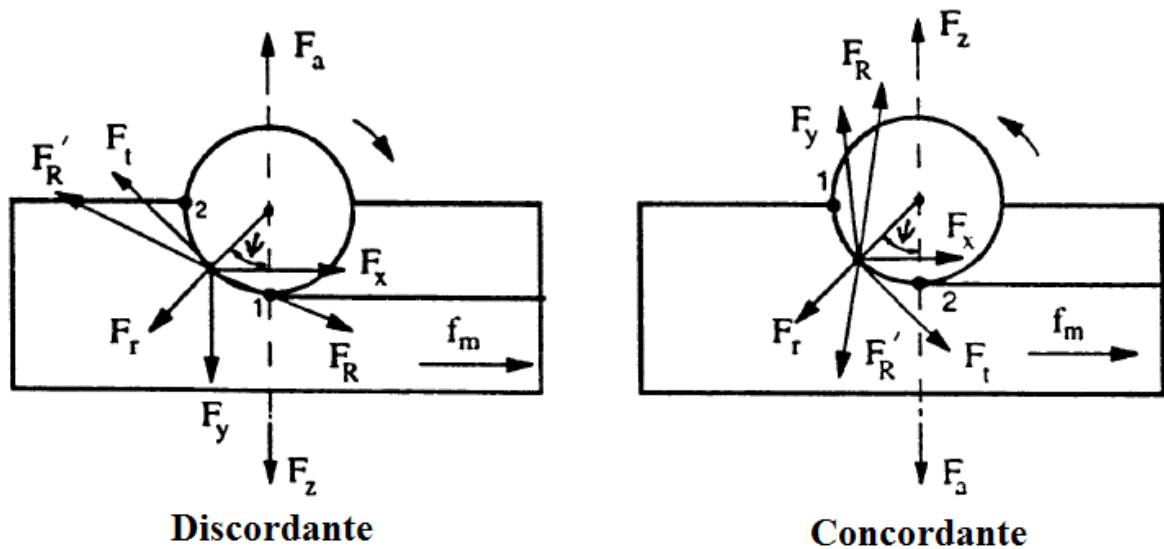


Figura 6 - Componentes da força de corte atuando em uma aresta.

Fonte: Alaudin et al (1998).

Na figura 7 pode-se observar a variação da força de corte sob influência da velocidade de corte nos dois sentidos.

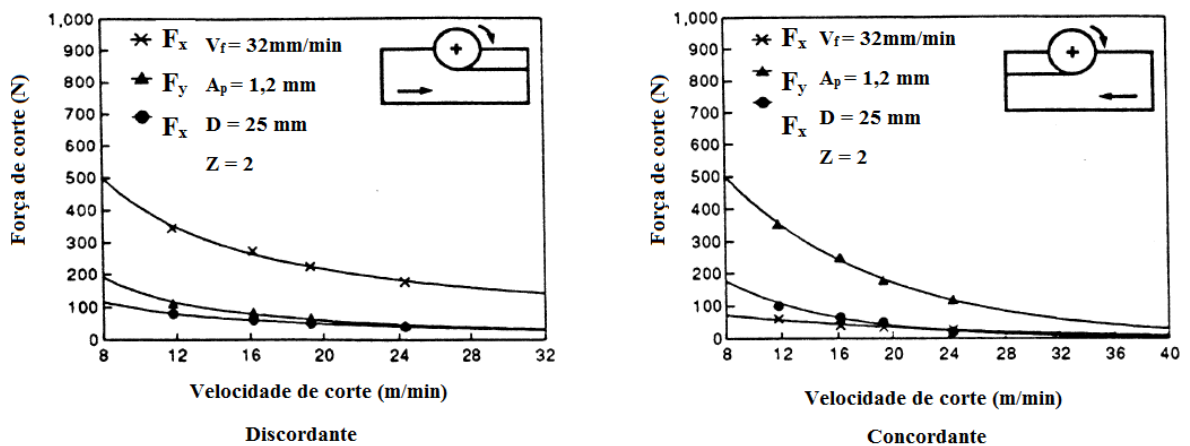


Figura 7 - Influência da velocidade de corte na força de corte para os movimentos discordante e concordante.

Fonte: Alaudin et al 1998.

Testes realizados por Alaudin et al. (1998) demonstram como a força de corte varia nos dois movimentos, foram feito teste comparando a força de corte em função da V_c obtida nos dois sentidos. A força F_x se apresentou maior para o movimento discordante e teve uma redução gradual juntamente com o aumento da velocidade de corte, já no movimento concordante maiores forças atuaram no sentido F_y que também teve uma queda gradual com o aumento da velocidade de corte. Este resultado comprova que a força de usinagem atua de forma diferente para os dois movimentos. Em experimento realizado por Li et al. (2006) no fresamento do Inconel 718 foi observado que a força varia entre sucessivas passadas nos dois sentidos de corte, juntamente com a propagação do desgaste da ferramenta.

A figura 08 representa gráficos de força de corte em relação a velocidade de corte estudado por Alaudin et al. (1998).

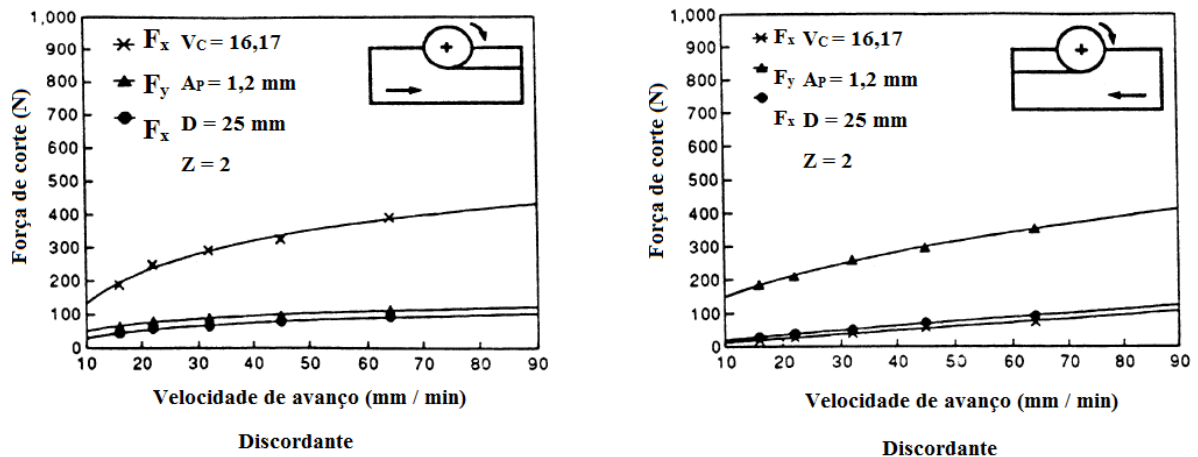


Figura 8 - Influência da velocidade de avanço na força de corte para os movimentos discordante e concordante.

Fonte: Alaudin et al 1998.

Alaudin et al. (1998) também avaliaram a variação da força em relação a velocidade de avanço nos dois sentidos. A força F_x aumentou com o aumento do avanço no movimento discordante. Já para o movimento concordante maiores forças foram encontradas na força F_y , dados apresentados na figura 8.

3.5 Acabamentos de superfícies na operação de fresamento.

Todas as superfícies após usinagem apresentam marcas do movimento da ferramenta devido ao cisalhamento do material, por mais que pareça lisa uma superfície, no ponto de vista microscópico existem pequenos erros, que são picos seguida de pequenas reentrâncias que são chamados de picos e vales. Rugosidade são marcas feitas pela ferramenta de corte durante a usinagem, que são compostas de irregularidade finas ou de erros microgeométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte, (Machado et al.2015). Esta rugosidade tem grande influência no comportamento dos componentes mecânicos e na sua funcionalidade, como ajuste de montagem, níveis de desgaste para peça moveis, vedação, pontos de concentração de tensão, etc. A ordem de desvio é definida em padrões internacionais, a norma DIN-4760(1982) os define da seguinte forma, desvios de primeiro e segundo ordem referem-se à forma, isto é, planicidade, circularidade, ondulação, que são devidos a erros da máquina-ferramenta, deformação da peça de trabalho, configurações erradas, vibração e material de peça de trabalho. Os desvios de terceira e quarta ordem referem-se a ranhuras, rachaduras e deteriorização, que estão ligados à forma e condição das arestas de corte, formação do cavaco e cinemática do processo. Os desvios de quinto e sexta ordem referem-se à estrutura do material da peça, que está conectada a mecanismos físico-químicos que atuam em uma escala de grãos (deslizamento, difusão, oxidação, tensão residual, etc.). Bernados et al (2002) mostra na figura 9 a ordem de desvio segundo a norma DIN- 4760 (1982).

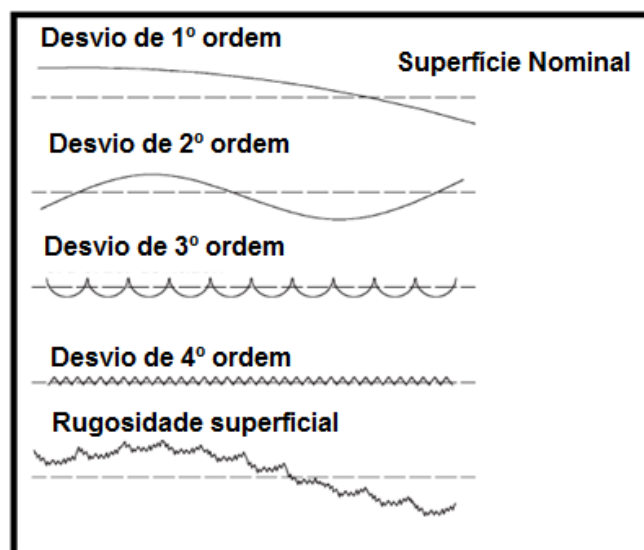


Figura 9 - Desvios na forma da superfície.

Fonte: Bernados et al (2002).

Machado et al. (2015) define ainda que o acabamento de uma superfície usinada é a combinação de vários fatores que podem ser divididos em rugosidade, ondulação e falhas. Define esses fatores da seguinte forma:

- ondulação: Consistem em irregularidades superficiais ou de erros geométricos cujos espaçamentos são maiores que as irregularidades consideradas rugosidades. Podem ser causada por vibrações e flexões da ferramenta e/ou peça em virtude da força de usinagem, temperatura de corte ou erros de fixação da peça ou ferramenta.
- falhas: São interrupções na topografia típica de uma superfície. São não intencionais, inesperadas e indesejáveis. Pode causadas por defeitos inerentes, como inclusões, trincas, bolhas, ou podem surgir também durante o processo de corte.
- rugosidade: A rugosidade de uma superfície é composta por de irregularidades finas ou de erros microgeométricos resultantes de ação inerente ao processo de corte.

Ondulação e falhas representam erros no processo de fabricação, portanto devem ser evitadas, enquanto que a rugosidade são parâmetros de saída da usinagem, que são programados de acordo com a aplicação final da superfície usinada.

A rugosidade pode ser afetada por muitas variáveis e ser avaliadas por diversos parâmetros, conforme Santos e Sales (2007) podem ser classificados em:

- parâmetros de amplitude: determinados por altura e picos, profundidades de vales ou pelos dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície.
- 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.

A rugosidade pode ser medida em vários parâmetros, sendo o parâmetro Ra (desvio médio aritmético) o mais utilizados nas indústrias e aplicável na maioria dos processos de fabricação. Devido a sua grande utilização, quase todos os equipamentos apresentam esse parâmetro (de forma analógica ou digital eletrônica

3.6.1. Cálculo de desvio médio aritmético no fresamento frontal.

$$R_a = \frac{r_\epsilon \sqrt{r^2 \left(\frac{f_z}{2}\right)^2}}{2}$$

Onde :

R_a = desvio médio aritmético

r_ϵ = raio de ponta

f_z = avanço por dente

3.5.1 Efeitos dos parâmetros de corte sobre a rugosidade.

O acabamento da superfície fresada sofre várias influências dos parâmetros de usinagem, tais como: a geometria da ferramenta, tipo de peça, rigidez da máquina-ferramenta, material da ferramenta e condições de corte. A rugosidade superficial é afetada por muitos parâmetros de processo, os que podem ser controlados (como velocidade de corte, profundidade de corte e taxa de avanço) e outros parâmetros que não podem ser controlados (como condições de corte, propriedades do material da peça, qualidade da peça, geometria da ferramenta, vibrações da máquina ferramenta, desgaste da ferramenta etc.) que são difíceis de alcançar e monitorar continuamente (Simunovic et al. 2013). Dentre vários fatores que afetam a rugosidade pode-se citar o raio de ponta da ferramenta e o avanço de corte os mais influentes. Um raio de ponta maior tende a formar vales menos profundo contribuindo para um bom acabamento. Menores avanços aliados a altas velocidade de corte proporcionam também um melhor acabamento. Para Riu et al,(2005) a precisão da forma de superfície depende das condições de corte, números de aresta, métodos de corte e sentido de corte (discordante e concordante). Para operações de fresamento feitas com inserto de metal-duro que possua uma face plana (alisadora), que atua como aresta alisadora secundária pelos dentes subsequentes aquele que realizou o corte, obtendo assim um melhor acabamento. As fresas de topo de aço rápido não possuem aresta alisadora, possui a superfície secundária de folga que influencia na rugosidade. A figura 11 apresenta uma fresa de metal duro com superfície alisadora e fresa de topo sem superfície alisadora durante a operação de fresamento

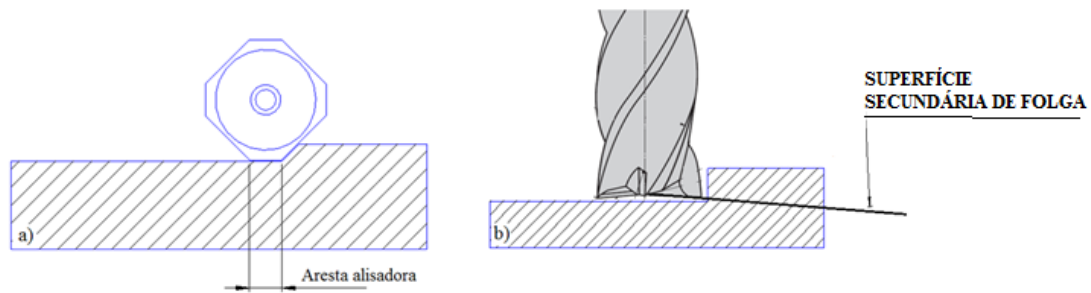


Figura 10 - Fresa de facear de metal duro com aresta alisadora secundária e fresa de aço-rápido com superfície secundária de folga.

Fonte: O autor.

Bernardos et al., (2002) apresenta o conjunto de parâmetros que influencia a rugosidade da superfície.

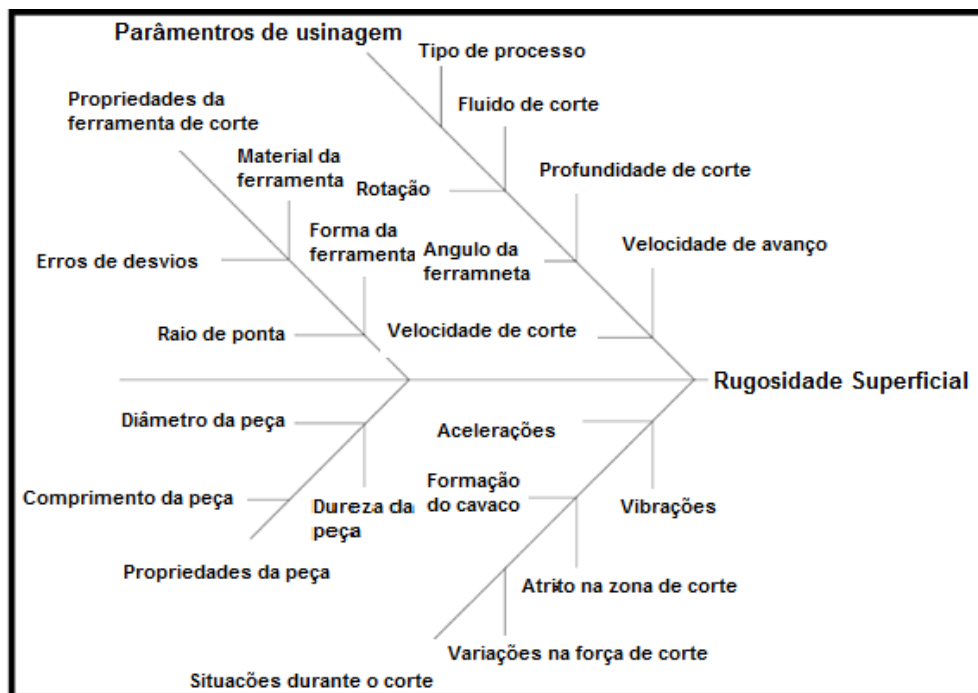


Figura 11 - Diagrama de espinha de peixe com os parâmetros que afetam a rugosidade da superfície.

Fonte: Benardos et al (2002).

3.5.2 Medição da rugosidade superficial.

Como visto, a importância de se controlar a rugosidade de componentes mecânicos, sendo assim, se faz necessário estabelecer as suas grandezas que permitem caracterizá-la, bem como as técnicas empregadas com essa finalidade (SANTOS E SALES,2007). A medição da rugosidade pode ser feita por meio de instrumentos de contatos e óticos. Instrumentos de contato são conhecidos como rugosímetro que possui uma agulha que faz a varredura da superfície se deslocando verticalmente entre os picos e vales de acordo com a topografia da superfície usinada. Esse deslocamento vertical é convertido em sinal elétrico e amplificado, os resultados são na forma numérica e de gráficos. A medição por meios óticos tem grandes vantagens por não terem contatos diretos com a superfície usinada. Podem ser feitas através de sonda que incide raios infravermelhos sobre a superfície da peça detectando a dispersão dessa dispersão por meio de uma matriz de fotodiodos. Esse método é utilizado quando os palpadores convencionais podem causar danos a superfície em questão, tipos, borrachas, folhas delgadas, discos rígidos e cilindros de fotocopiadoras. A sonda ainda exige uma boa limpeza prévia da superfície, uma vez que qualquer sujeira ou vibração pode alterar o valor da medição, tamanha é a precisão deste método. Outro método de medição sem contato é por meio de instrumentos com os microscópio óticos confocais. Este estabelece um caminho especial para um feixe de luz no qual as posições de foco de iluminação e imagem estão alinhadas entre si, isto é, convocalmente, o que resulta em um filtro ótico de raios refletidos da superfície sendo medida. Áreas desfocadas na superfície aparecem escuras, mediante este arranjo de foco a luz. Se as lentes da imagem são movidas perpendicularmente á superfície, é possível determinar a posição de foco e assim a altura absoluta de cada imagem com base no brilho máximo (MACHADO et al., 2015) .A perfilometria tridimensional é capaz de fornecer imagem 3D e pode ser seccionada em qualquer direção obtendo uma melhor caracterização da superfície. A avaliação da superfície pode ser feitas também por microscópio óticos ou eletrônicos, mas neste caso somente avaliação qualitativa é válida.

3.6 Desgastes da ferramenta.

A usinagem se baseia em alguns fatores como atrito, deformação, velocidade e temperatura estes atuando diretamente na aresta cortante da ferramenta, portanto a aresta tem

que suportar uma grande carga de situações que são danosas para ela. O desgaste da ferramenta é o resultado de uma combinação de fatores: mecânico, químico, térmico e abrasivo, atuando na aresta de corte da ferramenta (NOURI et al.,2015). Assim pode-se dizer que por mais que seja dura e resistente uma ferramenta ou por mais macio que seja o material que está sendo usinado, essa ferramenta sofrerá um desgaste contínuo, que pode ser de forma lenta ou rápida. Como toda ferramenta em qualquer situação vai sofrer um desgaste, assim se torna primordial o entendimento das causas dos desgastes da ferramenta de corte. Em tribologia, Hutchings (2017), define desgaste como sendo a destruição de uma ou ambas as superfícies que compõem um sistema tribológico, geralmente envolvendo perda progressiva de material. A ferramenta durante a usinagem está submetida a um forte atrito que implica em altas temperaturas, que leva ao desgaste que não pode ultrapassar um limite aceitável, isto pode trazer vários riscos ao processo, comprometendo a própria ferramenta e podendo levar ao colapso total prejudicando a peça que está sendo usinada tanto no sentido de acabamento ou dimensional. Machado et al.(2015) define as três como fenômeno que altera a geometria da ferramenta de corte sendo elas:

- Avaria: fenômeno que ocorre de maneira repentina e inesperada, causada pela quebra, lascamento ou trinca da aresta de corte, avaria pode ser de origem térmica e mecânica.
- Desgaste: A Norma ISO 3685 (1992) define desgaste em ferramentas como sendo: mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material. A destruição relacionam-se alterações geométricas, e ao desgaste em usinagem, a mudança da geometria da ferramenta de corte por perda de massa. São três as formas de desgaste, desgaste de cratera, desgaste de flanco e desgaste de entalhe.
- Deformação plástica: mudança da geometria da aresta de corte pelo deslocamento de material. Ela ocorre por cisalhamento devido as altas tensões atuantes nas superfícies das ferramentas de corte. Em casos extremos, vai levar á total destruição da cunha cortante.

A literatura apresenta variações na classificação dos mecanismos de desgaste, porém a grande maioria considera pelo menos seis, Santos e Sales (2007) as define como:

- cisalhamento a altas temperaturas: não é propriamente um mecanismo, mas sim um processo de desgaste, ocorrendo mais provavelmente na usinagem com alto ponto de fusão em ferramentas de aço-rápido.
- deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão: é mais um processo do que um mecanismo de desgaste, que ocorre na usinagem dos materiais de alta dureza. A combinação de altas tensões de compressão com elevadas temperaturas na superfície de saída, pode provocar deformação plástica da aresta de corte das ferramentas de metal duro e aço rápido.
- desgaste difusivo: este mecanismo envolve a transferência de átomos de um material para o outro e é dependente da temperatura e solubilidade dos elementos da zona de fluxo. A área desgastada, quando observada quando observada no microscópio, é lisa. Na usinagem, as velocidades relativas entre a ferramenta e peça são altas, e o tempo de contato entre estes materiais é muito pequeno. Isto tornaria desprezível o mecanismo de difusão se não fosse a existência de uma zona de aderência(morta ou de fluxo) na interface cavaco ferramenta(Trent e Wright, 1991). A saturação desta zona de aderência pode funcionar como uma barreira á difusão.
- desgaste por aderência: ocorre, geralmente, a baixas velocidades de corte, onde o fluxo de material sobre a superfície de saída torna-irregular. A APC aparece e o contato com a ferramenta torna-se menos contínuo. Sob estas condições, fragmentos microscópicos são arrastados junto com o fluxo de material. Este fenômeno acontece na zona de escorregamento, durante o fresamento, com uso de profundidade de corte irregular ou falta de rigidez do equipamento.
- desgaste abrasivo: envolve perda de material por microsulcamento, microcorte ou microlascamento, causado por partículas de elevada dureza relativa.Estas partículas podem estar contidas no material da peça(óxidos, carbonetos e cabonitretos), ou são as partículas da própria ferramenta arrancadas por atrito, por exemplo. Este mecanismo de desgaste é muito importante na usinagem com pastilhas revestidas, cerâmicas puras e mistas.

- desgaste entalhe: não é propriamente um mecanismo, mas sim um forma de desgaste. Porém ainda não existe um consenso na literatura que explique exatamente o que provoca esse desgaste. Ele ocorre, principalmente, na usinagem de materiais resistente a altas temperaturas e com elevados grau de encruamento(tais como: ligas de níquel, titânio, cobalto e aço inoxidável). Nas regiões onde acontece este tipo de desgaste, as condições de escorregamento prevalecem e o mecanismo envolve abrasão e traferencia de material.

A figura 13 apresenta as principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte

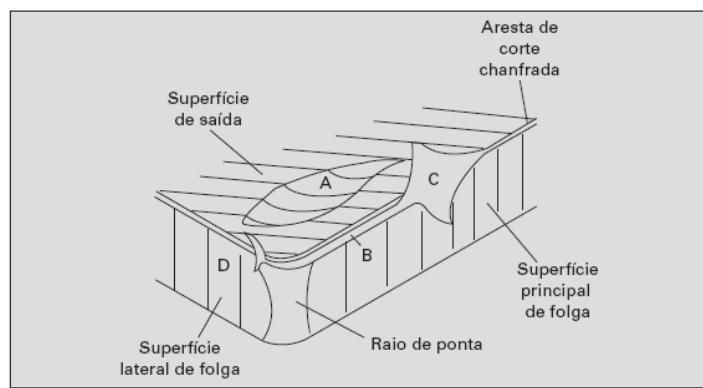


Figura 12 - Incipais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte.

Fonte: Machado et al (2015).

Onde:

A= Desgaste cratera

B= Desgaste de flanco

C e D+ Desgaste entalhe.

A figura 14 mostra os parâmetros utilizados pela norma ISO 3685(1977) para quantificar este desgaste.

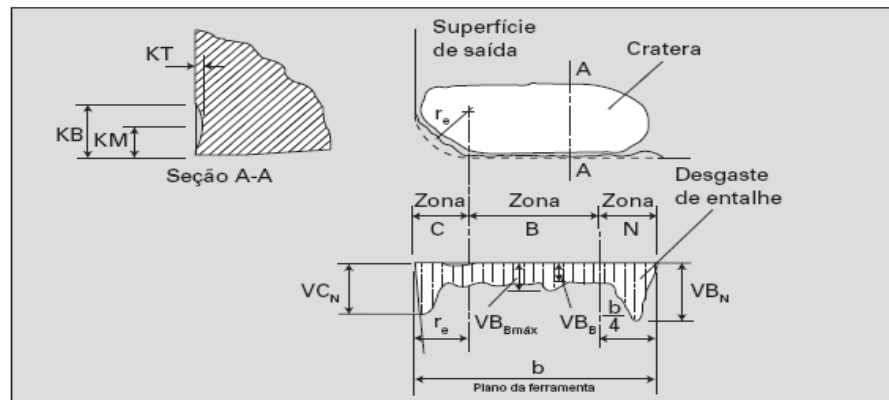


Figura 13 - Desgaste da ferramenta.

Fonte: Machado et al 2015.

Os principais são:

KT = profundidade da cratera.

VB_B = desgaste de flanco médio.

VB_{BMAX} = desgaste de flanco máximo.

VB_N = desgaste de entalhe.

VB_c = desgaste de ponta.

Portanto pode-se prever o tempo que uma aresta de corte permanece cortando de forma segura e econômica, denominada vida da ferramenta, Ferraresi (2000) define vida de ferramenta sendo como tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja um critério de fim de vida estabelecido. Então um critério deve ser definido. A ISO 3685 (1977) estabelece para desgaste de aço rápido, metal duro e cerâmica para desbaste os seguintes parâmetros.

- Desgaste de flanco médio (VB_B) = 0,3mm.
- Desgaste de flanco máximo (VB_{BMAX}) = 0,6mm.
- Profundidade cratera (KT) = $0,06 + 0,3f_c$, onde f_c é o avanço de corte em mm/rev.
- Desgaste entalhe (VB_N e VB_c) = 1mm.

Devemos adotar outros critérios que podem aparecer durante a usinagem que são na verdade sintomas do processo que vem a nos mostrar que a ferramenta não está trabalhando de forma segura e eficiente, entre eles estão os seguintes:

- Desvio dimensional e, ou geométrico.
- Perda de qualidade superficial da peça.
- Aumento de vibrações no processo.
- Alteração no cavaco.
- Aumento das forças envolvidas no processo.
- Alteração na profundidade de corte (A_p).
- Aumento da temperatura.
- Falha completa da ferramenta (quebra, Lascamento, trinca e desgaste difusão).

3.6.1 Desgaste da ferramenta no fresamento concordante e discordante.

Como visto a operação de fresamento é uma operação de corte interrompido, ou seja, não ocorre de forma contínua como no torneamento. A aresta de corte na operação de fresamento percorre uma trajetória circular, girando no sentido do eixo principal da fresadora, desta forma em algum momento a aresta toca na peça e começa a remover material e depois em outro momento ela sai da peça finalizando a usinagem daquela passada e depois percorre uma trajetória sem remoção de material. Esse espaço que ela percorre no vazio é que dá característica ao corte interrompido e são descritos como ciclos ativo e inativo. Pesquisa realizada por Bouzakis et al., 2003 mostrou que a cinemática do processo de fresagem discordante e concordante afetam significativamente a distribuição de tensão na ferramenta e o desempenho da operação de fresamento. Essa alternância no contato com a peça torna-se a operação de fresamento mais complexa quando analisados vários parâmetros na operação como forças envolvidas, vibrações, temperatura e conseqüentemente desgaste da ferramenta.

Na operação de fresamento as ferramentas estão sujeitas a alternância de tensões térmicas e mecânicas relativamente altas. Uma vez que essa tensão exceda a resistência à tração do material da ferramenta gera microtrincas, podendo-se propagar e levar a ferramenta ao colapso TIAN et al. (2103). Então, analisando o desgaste da ferramenta nessas condições pode-se dizer que as variáveis quando comparados com outros processos são mais complexas. Josic et al (2012) diz que este ciclo mecânico-térmico produz tensões de compressão e tração alternadas na ferramenta e que mesmo que essa tensão não seja o suficiente para quebrar a ferramenta instantaneamente, o ciclo de tensão térmico provoca falha por fadiga e desgaste da ferramenta. Para entender melhor sobre os ciclos ativo e inativo, podemos dizer que a aresta

de corte ao penetrar no material sofre com altas temperaturas e cargas mecânicas durante o corte, neste momento ela está no ciclo ativo (com remoção de material), mas ao sair do corte ela passa a ficar no ciclo inativo (sem remoção de material) sem esta em contato com peça, e depois volta a entrar em contato de novo no ciclo ativo. Essa variação cíclica do corte faz com que a temperatura da ferramenta sobe rapidamente e depois resfria e volta a aquecer de novo quando inicia um novo ciclo ativo, gerando desgaste de trincas de origem térmicas. A variação de esforços mecânicos também atua de forma bem significativa no desgaste da ferramenta. No início do ciclo ativo a aresta de corte sofre um grande impacto e as forças envolvidas crescem rapidamente e varia de acordo com a direção e espessura do cavaco isto acontecendo várias vezes por minuto leva ao desgaste de trincas por fadiga tipicamente de fresamento. Essas características mencionadas exigem um maior cuidado na escolha da ferramenta principalmente com a tenacidade e resistência ao choque térmico da ferramenta para que possa garantir um bom desempenho durante a usinagem. A aresta de corte pode sofrer avarias na entrada, no meio e na saída durante uma revolução da ferramenta, Santos e Salles(2007) mostra na figura 15 a variação da temperatura, a curva “a” representa o corte continuo onde a temperatura sobe rapidamente entrando em regime, a curva “b” mostra como o resfriamento ocorre quando cessado o corte na curva “c” é a resultante no corte interrompido e durante o ciclo ativo, há geração de calor, aumentando a temperatura da ferramenta, seguido do ciclo inativo, resfriando-a .Assim, a temperatura flutua ciclicamente.

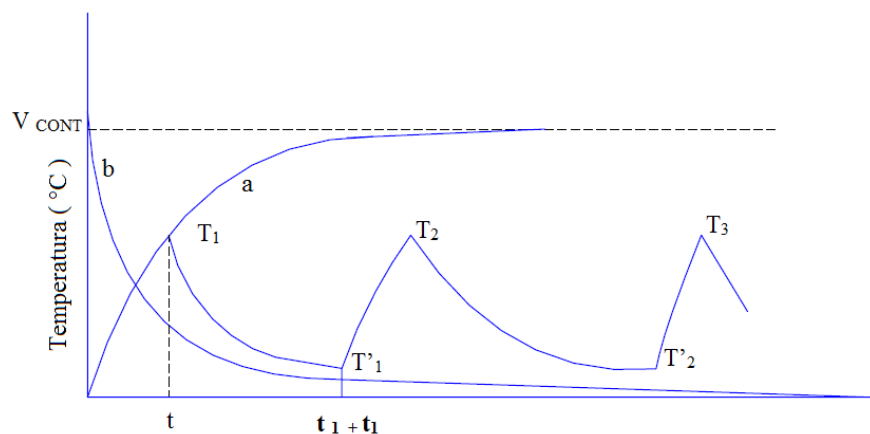


Figura 14 - Variação cíclica da temperatura no corte interrompido.

Fonte: Santos et al 2003

Um fator importante a ser observado é o desgaste da ferramenta que ocorre na entrada da aresta de corte no material, Stemmer et al (1992) citam que durante o movimento discordante devido as suas características a aresta escorrega sobre a peça antes da formação do cavaco provocando desgaste abrasivo, o material é mais duro, pelo encruamento do aresta precedente isto determina uma vida menor da aresta de corte. Com relação ao movimento concordante Stemmer et al 1992 cita também que durante á uma entrada abrupta da aresta de corte no material causando causando grande choque podendo levar a quebra de dentes ou o colapso total da ferramenta.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas as etapas seguidas para realização do procedimento experimental, material utilizado, equipamentos e metodologia adotada nessa pesquisa. O material deste experimento foi usinado no laboratório de Prática de Fabricação da Universidade Newton e os ensaios no laboratório de Automação do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da Universidade Federal de Minas Gerais.

4.1 Materiais

4.1.1 Corpo de prova

O material utilizado no experimento foi o aço ABNT 4140 de barra forjada submetido a tratamento térmico de normalização com temperatura de 820 °C durante 25 minutos e posterior resfriamento lento até a temperatura ambiente no qual atingiu dureza de 29 HRC.

Tabela 2 - Composição química do material utilizado nos testes, aço ABNT 4140.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	N
0,396	0,236	0,831	0,0082	0,011	0,836	0,174	0,0306

Fonte: Laboratório de ensaios mecânicos da Açoforja Indústria de Forjados (anexo A).

As figuras 15 indica a microestrutura do ABNT 4140 submetida a ataque de nital(2%), com microestrutura do aço baixa liga normalizado, com presença dos constituintes perlita (áreas escuras, aproximadamente 78%), ferrita e bainita (áreas claras, aproximadamente 22%).

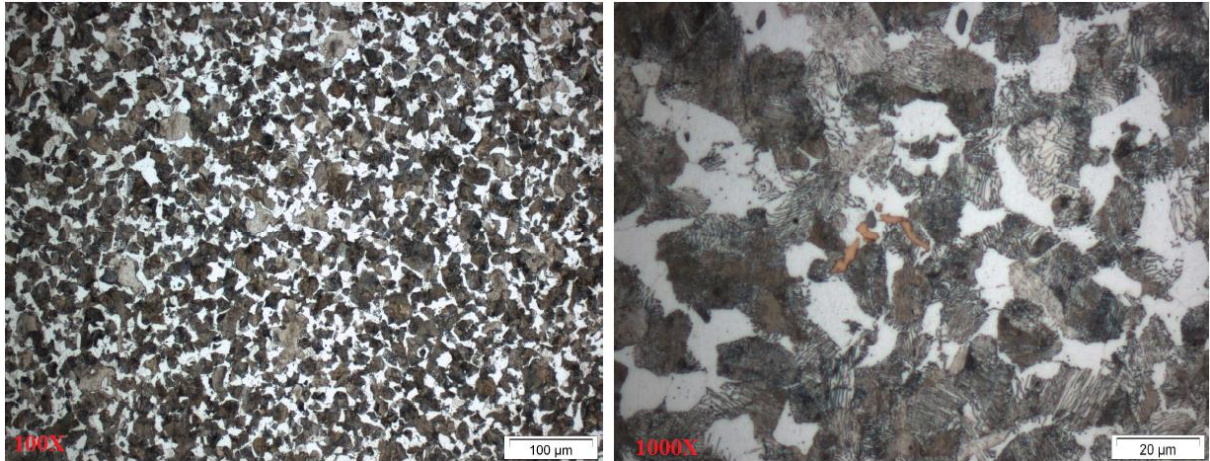


Figura 15 - (a) Seção longitudinal e (b) Seção transversal (400x)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 17 apresenta corpo de prova utilizado para teste de dureza e microestrutura.



Figura 16 - Corpo de prova para dureza e microestrutura.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os corpos de prova para execução dos testes de fresamento foram preparados e identificados com números tipados conforme apresentado na figura 18(a) com dimensões mostradas na figura 18(b).

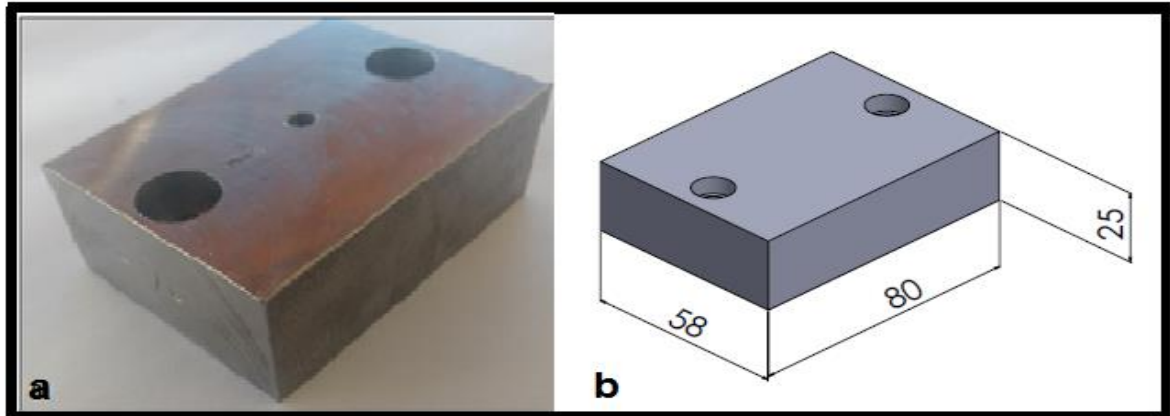


Figura 17 - (a) Corpo de prova utilizado no experimento e (b) dimensões do corpo de prova.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Fresa de topo

Os testes foram realizados utilizando-se uma fresa de topo de 6 mm de aço rápido com 4 aresta cortantes da classe M2 DIN 844 AN, a figura 19(a) abaixo mostra a fresa e 19(b) sua especificações.

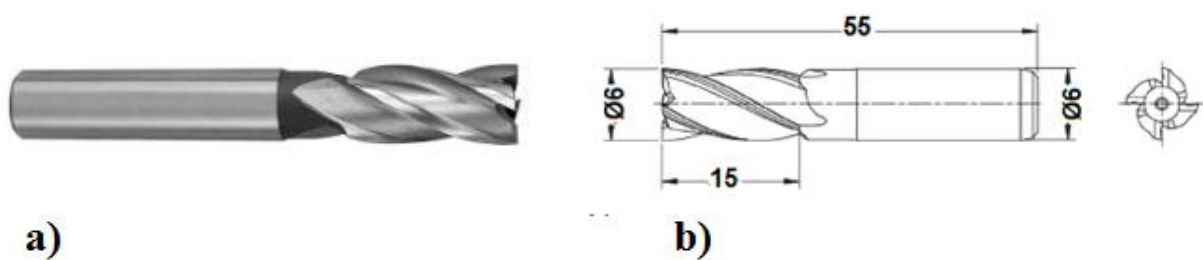


Figura 18 – a) Fresa de topo e b) Especificações

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Equipamentos

4.2.1 Forno elétrico

Para o tratamento térmico de normalização dos corpos de provas foi utilizado o forno elétrico tipo Mufla, modelo SP-1200 da marca SP Labor, conforme figura 20.



Figura 19 - Tratamento térmico dos corpos de prova.

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.2 Durômetro

Para medição da dureza dos corpos de prova foi utilizado um durômetro modelo HBRV-187.5 da marca da marca Panatec Atmi, conforme é apresentada na figura 21.

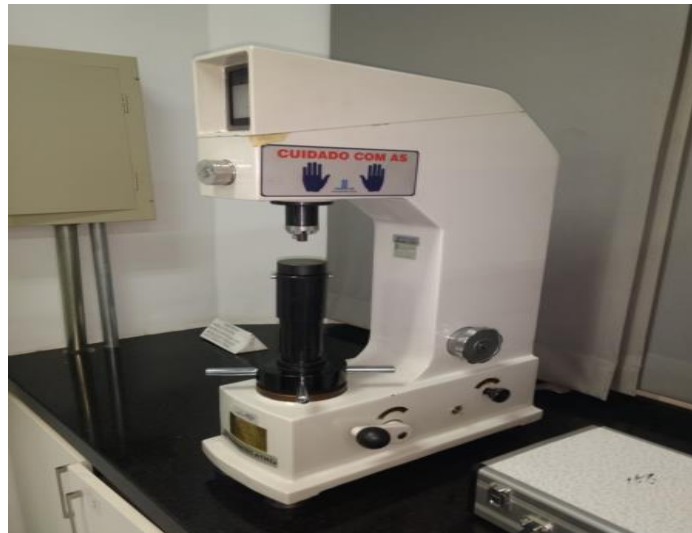


Figura 20 - Durômetro.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3 Centro de usinagem para preparação dos corpos de provas.

A usinagem de preparação dos corpos de prova foi feito em centro de usinagem da marca Timemaster, modelo MC-10 com potência de 8,0 kW e rotação máxima de 8000 rpm, do laboratório de Prática de fabricação do Centro Universitário Newton Paiva.



Figura 21 - Centro de usinagem utilizado para preparação dos corpos de provas.

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.4 Centro de usinagem para execução dos ensaios.

Os testes de fresamento foram executados em um centro de usinagem ROMI modelo Discovery 560 com potência de 9,0 kW e rotação máxima de 7500 rpm, equipado com comando numérico Siemens 810D pertencente ao laboratório de usinagem e Automação do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG.



Figura 22 - Centro de usinagem utilizado para os testes.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5 Dinamômetro

Para avaliação dos sinais de força durante o fresamento foi utilizado o dinamômetro Kistler modelo 9272 (figura 30) placa de aquisição *National Instruments* USB- 6366 e software Manuware.

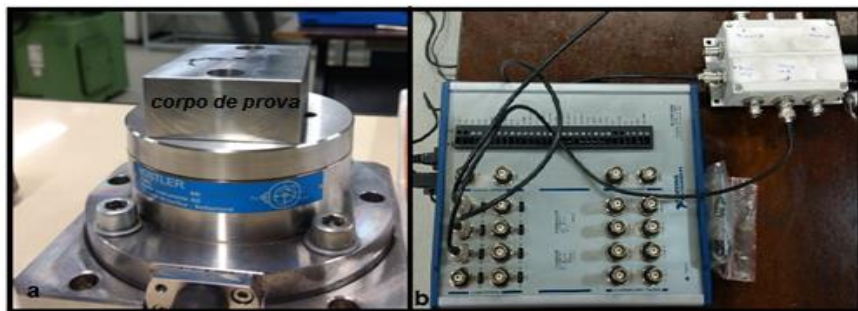


Figura 23 - Montagem do corpo de prova no dinamômetro (a) e placa de aquisição de sinais(b).

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.6 Rugosímetro

Para medição da rugosidade foi utilizado um rugosímetro digital TR-200 da marca Time, com as seguintes configurações: R_a de $0,1\mu\text{m}$ a $2\mu\text{m}$ comprimento de amostragem de $0,8\text{mm}$ (4mm) e para R_a de 2 a $10\mu\text{m}$ comprimento de amostragem de $2,5\text{mm}$ ($12,5\text{mm}$) conforme a figura 25.



Figura 24 - Rugosímetro digital

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.7 Análises do desgaste da ferramenta

Para análise do desgaste da ferramenta foram feitas imagens por microscópio de varredura (MEV) e ensaio EDS realizadas no laboratório do Centro de Microscopia da UFMG.

4.3 Método

Para um melhor entendimento da metodologia utilizada foi elaborado um fluxograma conforme figura 26.

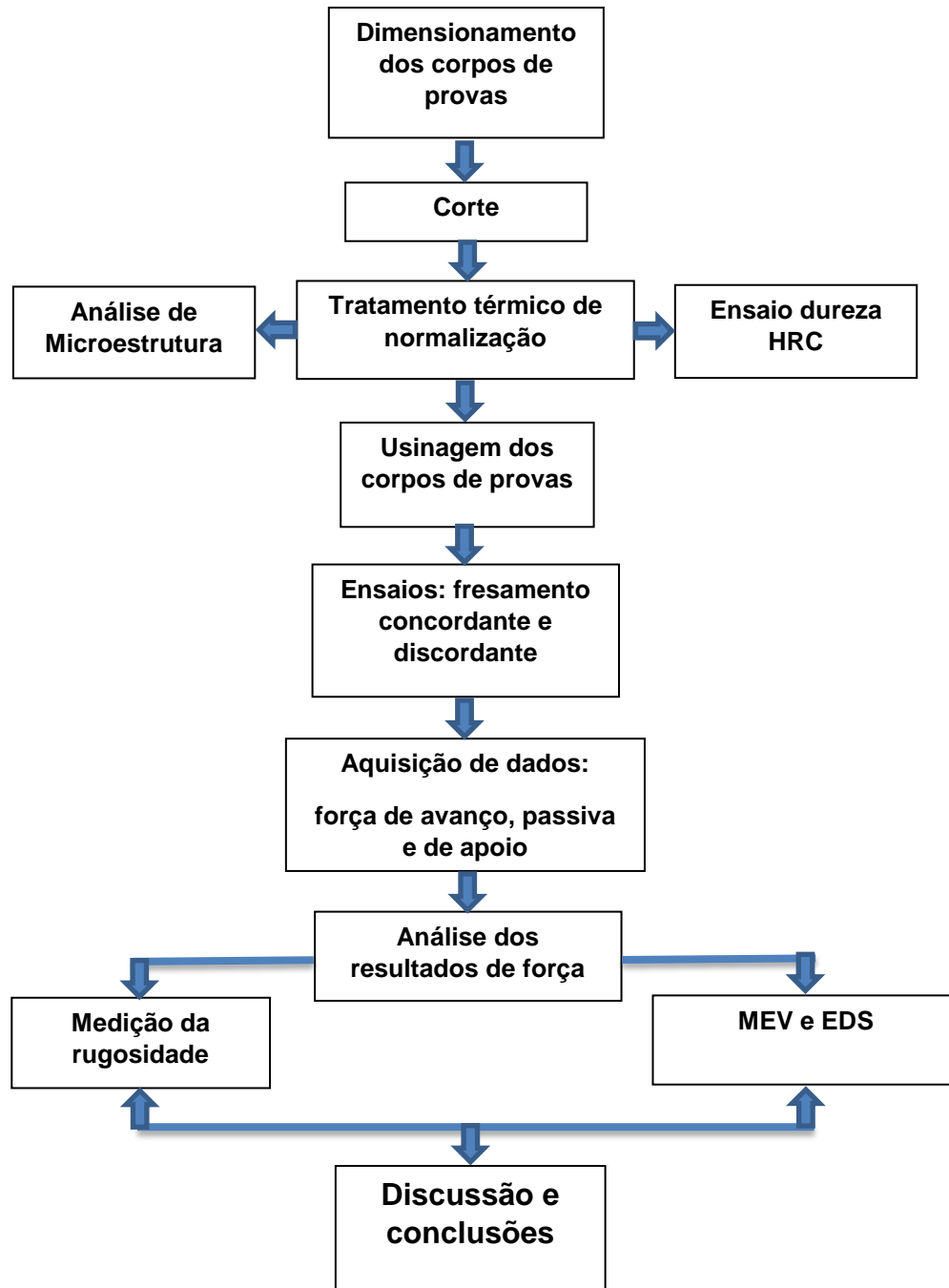


Figura 25 - Fluxograma do trabalho.

Fonte: O autor

4.3.1 Fresamento concordante e discordante

O fresamento foi realizado sem a utilização de fluido de corte. Foram utilizados seis corpos de prova, em cada um foi realizado a usinagem nos dois sentidos de corte (concordante e discordante) um em cada lateral do corpo de prova, utilizando uma fresa de aço rápido de 6mm com uma penetração radial de usinagem(a_e) de 3mm e penetração axial de usinagem(a_x) de 1mm, sendo o comprimento de usinagem de cada passo de 80mm, este passe foi repetido e incrementando 1mm de ap até atingir a profundidade de 20mm, totalizando 1600 mm de usinagem. Este procedimento foi realizado para cada sentido concordante e discordante. Foram utilizado três parâmetros de corte diferentes sendo v_c de 15 m/min constantes e fz variando de 0,018 - 0,03 e 0,04, feita a réplica de todos. Para cada movimento e parâmetros de corte foi utilizada uma fresa nova. Durante a usinagem foi feita a medição das forças nos três eixos. Após a usinagem de 1600 mm foi feita a medição do desvio aritmético médio por meio de rugosímetro digital. A figura 27 mostra os movimentos realizados nos ensaios.

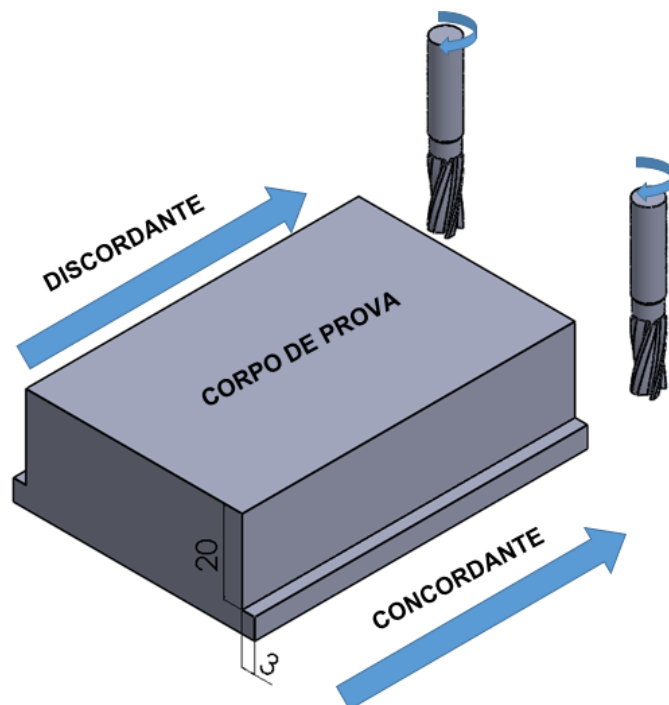


Figura 26 - Desenho esquemático do fresamento nos ensaios.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após executado o procedimento (figura 27) foi dada sequencia na usinagem até um desgaste significativo da ferramenta. Porém agora a ferramenta foi deslocado no sentido radial de usinagem(a_e) de 3mm e o incremento de 1mm de profundidade foi até 19mm, seguindo da mesma forma sempre reduzindo 1mm na profundidade total do rebaixo, isto foi necessário para que a passada da fresa não prejudicasse a superfície usinada anteriormente o que poderia comprometer a medição da rugosidade. Este procedimento foi repetido até um desgaste significativo da ferramenta. A figura 28 mostra procedimento seguido na usinagem para o desgaste da ferramenta.

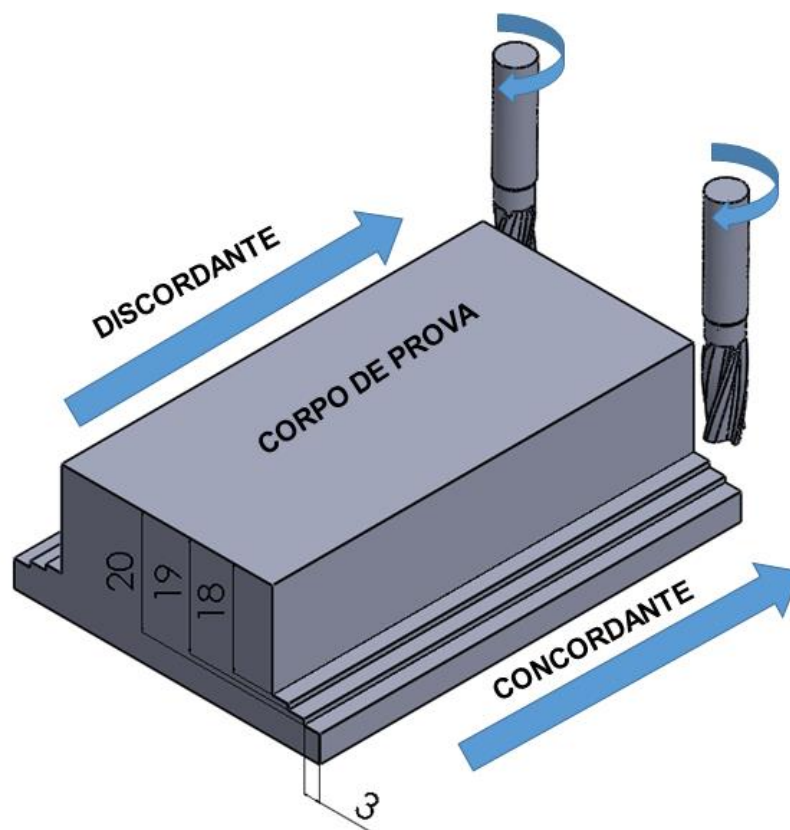


Figura 27 - Desenho esquemático da sequencia de fresamento para desgaste da ferramenta.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Montagem do corpo de prova no dinamômetro

Foram realizados no corpo de prova furos passantes para fixação adequada no dinamômetro conforme mostra figura 29.

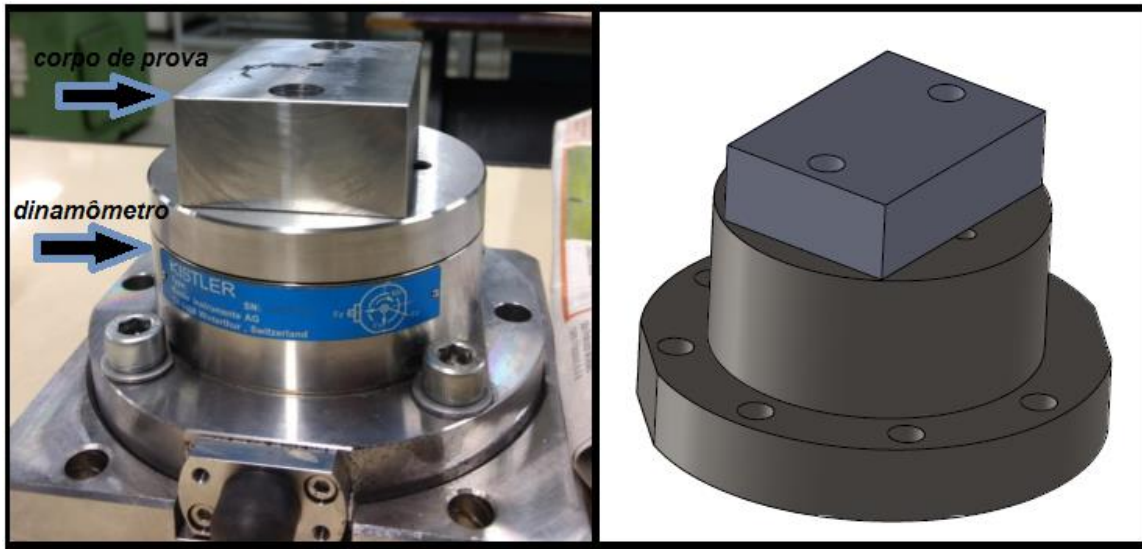


Figura 28 - Fixação do corpo de prova no dinamômetro.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3 Parâmetros de corte utilizados nos ensaios

Foram utilizado três parâmetros de corte, variando somente o avanço f_z conforme é apresentado na tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Parâmetros de corte utilizados

	Diâmetro (mm)	a_e (mm)	Z	a_p (mm)	F_z (mm/aresta)	Vc (m/min)
1º Condição	6	3	4	1	0,018	15
2º Condição	6	3	4	1	0,03	15
3º Condição	6	3	4	1	0,04	15

Fonte: O autor

A figura 30 apresenta a operação de fresamento concordante.



Figura 29 - Fresamento durante os ensaios.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.4 Aquisição de dados da força

A aquisição dos sinais de força durante o fresamento concordante e discordante foi na direção da força de avanço - F_x , força de apoio - F_y e direção da força passiva - F_z . Sendo necessária a calibração estática do dinamômetro, devido à ausência do amplificador do dinamômetro e gerando equações lineares para poder determinar a força durante o fresamento. Posteriormente os dados coletados foram exportados para o software Matlab 2015 para análise.

A figura 31 apresenta a montagem do corpo de prova e dinamômetro na fresadora



Figura 30 - Montagem do dinamômetro

Fonte: Elaborado pelo autor.

O dinamômetro foi montado diretamente na mesa da fresa e o corpo de prova fixado diretamente no dinamômetro evitando assim qualquer dispositivo intermediário que poderia atrapalhar o envio dos sinais e comprometendo assim a análise de resultados.

Na figura 32 é indicado a direção das forças presentes na operação de fresamento.

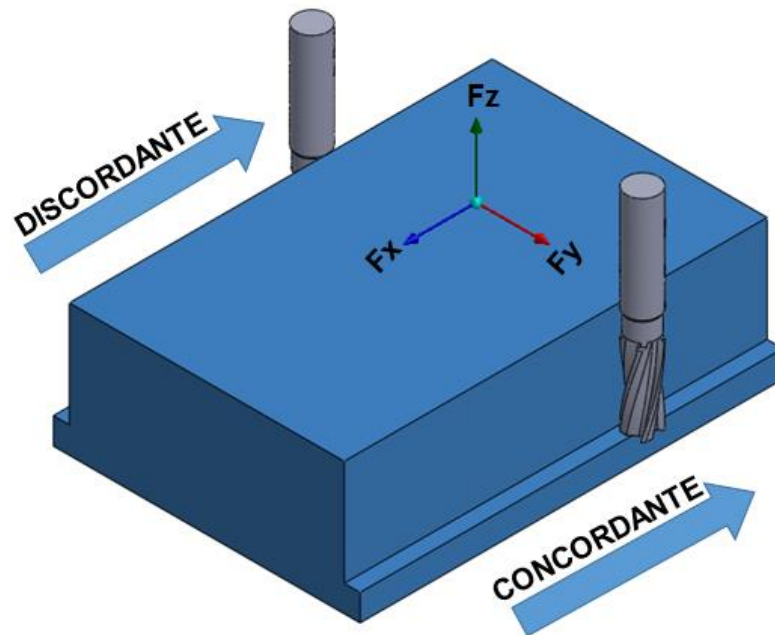


Figura 31 - Sentido da força durante o fresamento.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O corpo de prova foi fixado na fresadora de forma que a usinagem ocorresse no sentido horizontal da mesa da fresadora, ou seja, o avanço de corte ocorreu no sentido da força F_x da máquina.

Para verificação do dinamômetro foram utilizados cargas de 10N e 20 N conforme figura 33 abaixo

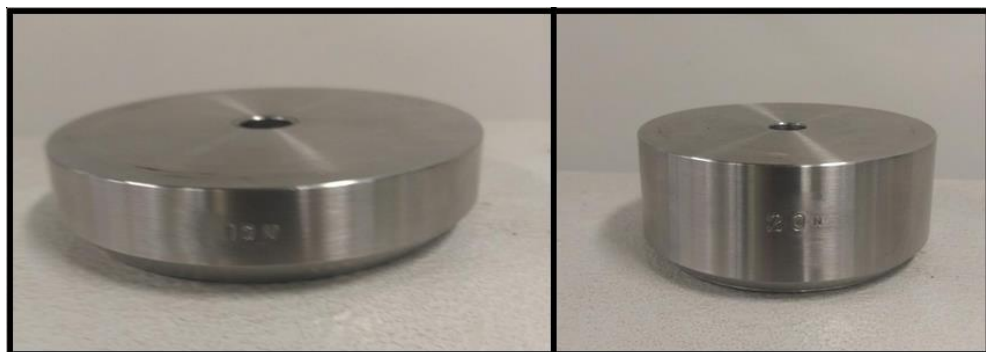


Figura 32 - Cargas de 10 e 20N.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 34 mostra o esquema de montagem do dinamômetro.

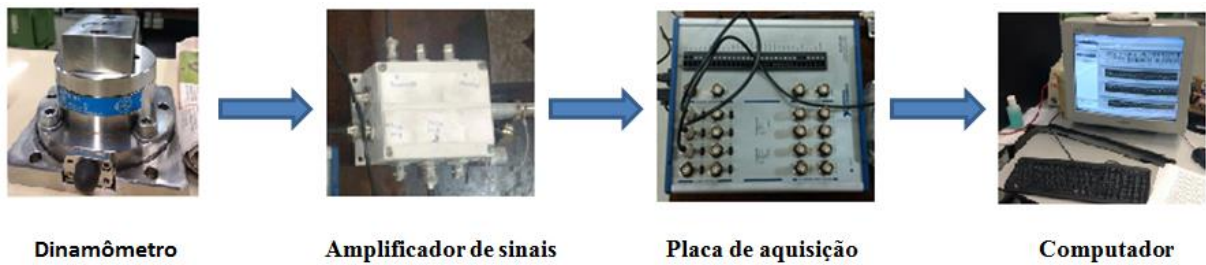


Figura 33 - Esquema de montagem do dinamômetro.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O esquema de montagem para aquisição das forças geradas durante os ensaios seguiram a ordem de acordo com o esquema mostrado na figura 34 partindo do dinamômetro seguido para o amplificador, placa de aquisição e análise dos dados no computador.

4.3.5 Medição da rugosidade

Ao término da usinagem realizaram-se três medições do desvio aritmético médio - (R_a) para cada rebaixo usinados nos corpos de provas com o rugosímetro digital de acordo com a NBR ISO 4287. Os valores recomendados para os comprimentos de amostragem e de avaliação estão de acordo com a norma ISO 4288 (1996, apud MACHADO *et al.*, 2011). Foi utilizado um traçador de altura da Marca Digimess para apoiar o rugosímetro auxiliando na medição conforme a figura 35.



Figura 34 - Medição da rugosidade.

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 Planejamento fatorial completo

Realizou-se o planejamento fatorial completo, sendo utilizados dois fatores, correspondente ao avanço (f_z) e o movimento de corte. Em relação ao avanço foram utilizados três níveis e para o movimento de corte foram utilizados dois níveis, o movimento concordante e discordante.

O movimento de corte e avanço por aresta (f_z) foram escolhidos por influenciarem o desgaste da ferramenta. Os valores de avanço f_z utilizados no experimento foram baseados nos dados do fabricante, conforme catálogo Indaço (2017). Porém, estes valores foram aumentados para prover um maior desgaste da ferramenta, sendo os avanços de 0,03 mm/aresta-0,018 mm/aresta e 0,04 mm/aresta executado para os dois sentidos de corte (concordante e discordante). O objetivo foi correlacionar a variação dois sentidos (concordante e discordante) juntamente com o avanço f_z em relação ao parâmetro de saída da rugosidade Ra. O planejamento fatorial aplicado neste trabalho é uma matriz tipo 3 x 2, apresentando 6 combinações possíveis. Para avaliar a repetibilidade do sistema, realizou-se uma réplica, totalizando 12 ensaios. Analisaram-se os dados com o auxílio do *software* estatístico MINITAB versão 17, e a técnica estatística empregada foram a Análise de Variância (ANOVA), para um nível de significância de 95%. Efetuou-se a análise dos resíduos, além dos efeitos principais e das interações para todas as combinações descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Condições testadas.

FATORES	NÍVEIS		
AVANÇO por aresta	0,03	0,018	0,04
MOVIMENTO	CONCORDANTE		
	DISCORDANTE		

Fonte: O autor

4.5 Desgaste da ferramenta

Para estudo e análise do tipo e mecanismo de desgaste da ferramenta foram obtidos imagens por MEV no laboratório de microscopia da UFMG. E para comprovação ou não de adesão do material da peça sobre a ferramenta de corte foi realizado ensaio EDS também no laboratório de microscopia da UFMG. No final dos testes foram utilizados 6 corpos de provas, 12 fresas e totalizando um percurso de avanço de 40500 mm , os resultados obtidos, análise e conclusões são mostrados no capítulo a seguir.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados baseados nos resultados obtidos, passando pela rugosidade, força de corte e desgaste da ferramenta.

5.1 Rugosidade

Os parâmetros de rugosidade Ra foram medidos em cada peça usinada e com suas respectivas réplicas. Para atestar o modelo e validar a ANOVA, verificou-se a distribuição de probabilidade aplicando o teste de Anderson-Darling. A figura 36 mostra o gráfico de probabilidade normal dos resíduos com o seu respectivo p-valor.

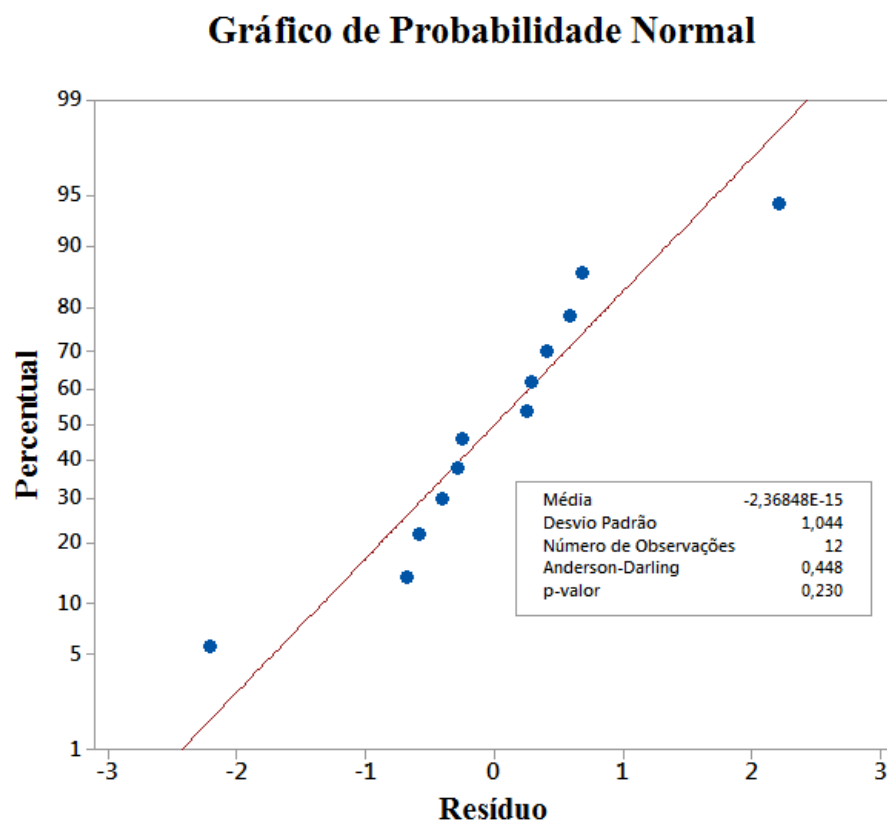


Figura 35 - Gráfico de probabilidade para rugosidade média

FONTE - O autor

O teste de Anderson-Darling apresentou um p-valor de 0,230, atestando a normalidade dos dados, visto que esse foi superior ao nível de significância de 0,05. Os valores dos resíduos estão distribuídos ao redor da linha reta, comprovando que os dados amostrais apresentaram uma distribuição normal. Para a validação do modelo, realizou-se a análise de resíduos padronizados para os dados da rugosidade. A figura 37 (a) detalha o gráfico de resíduos versus ordem. Em relação ao tempo, mostra-se que os resíduos são independentes e não correlacionados, que comprova que a variância é constante. A figura 37 (b) detalha os resíduos padronizados versus ajustes, observa-se que dos 12 pontos avaliados, 68% dos resíduos estão compreendidos entre os limites ± 1 e os demais entre os intervalos ± 2 , conforme detalhado por Montgomery (2016), comprovando que os resíduos padronizados para os dados de rugosidade média, atendem a condição de distribuição normal com média zero e variância constante, sendo que a regressão gerada pela ANOVA pode ser confirmada.

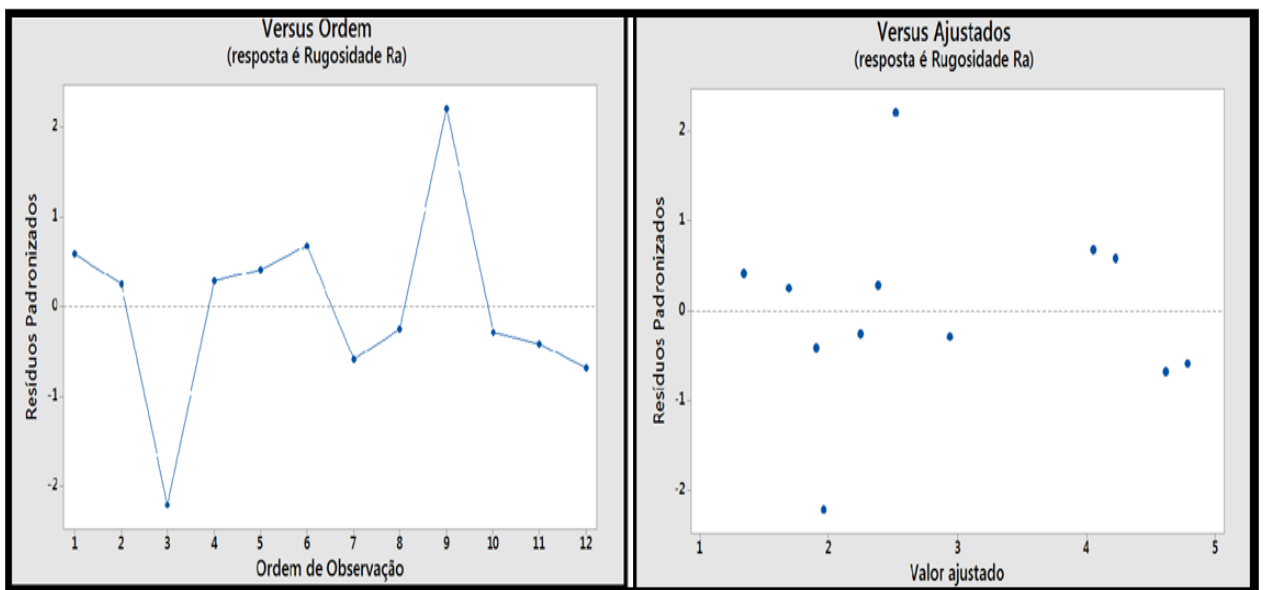


Figura 36 - a) análise dos resíduos versus ordem, b) análise dos resíduos versus ajustes.

FONTE - O autor

A tabela 5 apresenta os dados da ANOVA para a rugosidade média. O nível de explicação do modelo para a variação da rugosidade foi de 93,08%. Com base nas discussões acima, pode-se afirmar que os erros decorrentes do modelo foram aleatórios e que a regressão gerada pela ANOVA pode ser confirmada. No Apêndice B, apresentam-se os valores rugosidade.

Tabela 5 - Análise de variância para os dados da rugosidade

FONTE	GL	SQ(AJ)	QM(AJ.)	VALOR F0	p-VALOR
MODELO	6	16,214	2,702	11,210	0,009
BLOCOS	1	0,938	0,938	3,890	0,106
LINEAR	3	1,409	0,47	1,950	0,240
AVANÇO	2	1,288	0,644	2,670	0,162
DIREÇÃO	1	0,121	0,121	0,500	0,510
INTERAÇÃO DE DOIS FATORES	2	13,866	6,933	28,750	0,002
AVANÇO X MOVIMENTO	2	13,866	6,933	28,750	0,002
ERRO	5	1,205	0,241		
TOTAL	11	17,420			
SUMÁRIO MODELO	S	R2	R2(aj)	R2(pred)	
	0,491093	93,08%	84,77%	60,13%	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao se analisar os efeitos principais foram verificados as interações de segunda ordem, estas se mostraram significativas dentro do intervalo de confiança estudado. A mudança no avanço e sentido de corte apresentou uma correlação estatisticamente significativa em relação à resposta de saída Ra. A figura 38 apresenta o gráfico com as respectivas interações.

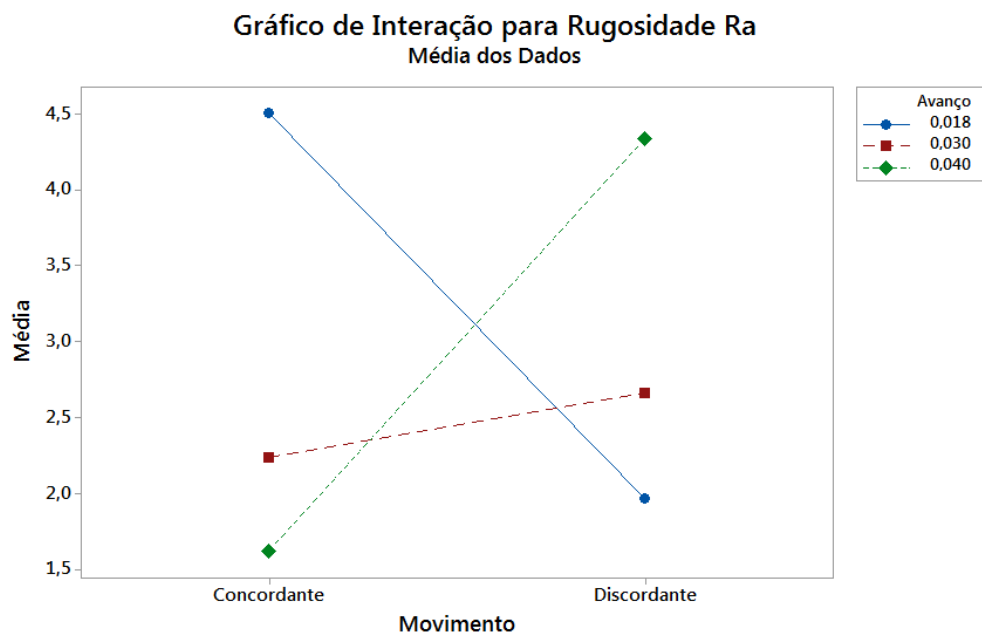


Figura 37 – Gráfico de Interação para rugosidade Ra.

Fonte - O autor

O gráfico apresentado resume todos os valores obtidos da rugosidade por avanço de corte f_z relacionado aos dois movimentos.

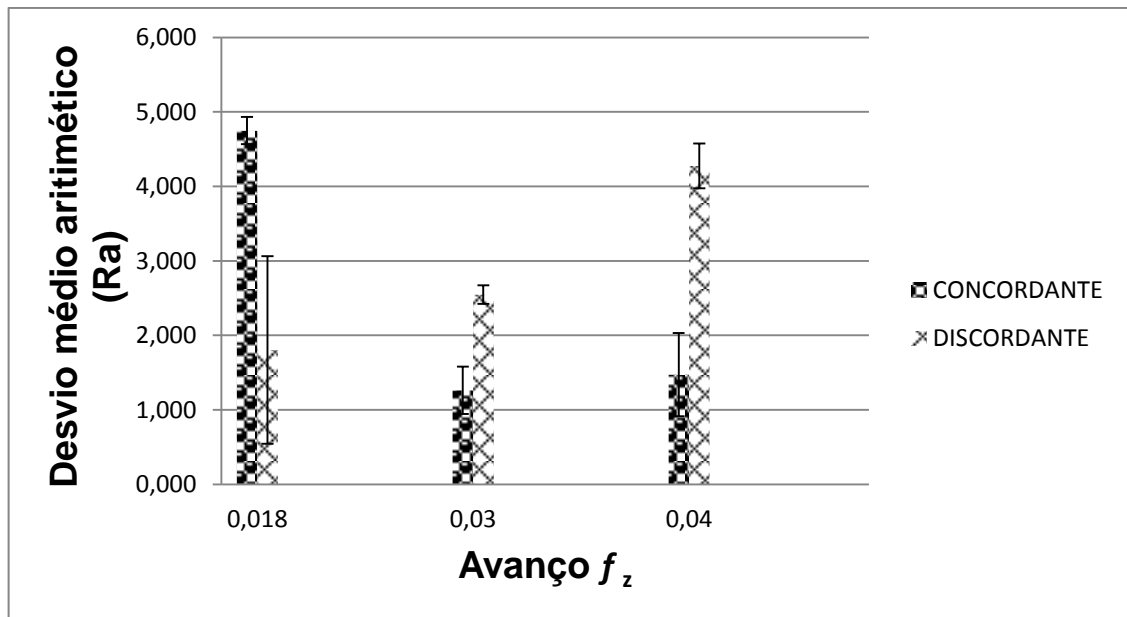


Figura 38 - Gráfico com as medias de rugosidade.

Fonte: O autor.

Em comparação dos sentidos com a rugosidade Ra, nota-se que no avanço 0,018 mm/aresta no movimento concordante obteve menores valores de Ra e apresentando grande diferença entre os dois movimentos, que pode ser explicado devido ao desgaste severo ocorrido na ferramenta durante o movimento concordante que se refletiu em um pior acabamento da peça, esse desgaste severo ocorrido nestas circunstâncias serão explicados melhor na análise de desgaste da ferramenta. Para o avanço de 0,03 mm/aresta e 0,04 mm/aresta o sentido concordante obteve menores valores de Ra em relação ao discordante, nesta situação como não houve desgaste exagerado da ferramenta, a rugosidade seguiu a lógica normal quando se estuda os dois movimentos, ou seja, em máquinas sem folga o movimento discordante apresenta maiores valores de Ra, justificado pela maneira de como aresta de corte toca a peça no início da usinagem, onde a espessura de corte inicia é zero e aumenta gradualmente cria-se grande atrito entre ferramenta e peça fazendo com que a rugosidade aumente neste movimento. Outro fator importante a ser considerado é o fato de que os cavacos ficam mais suscetíveis a cair na frente da fresa podendo ser novamente atingidos pela fresa o que também pode prejudicar o acabamento. Em relação a análise do avanço, exceto para o de 0,018 mm/aresta que teve maior valor de Ra no movimento concordante, as demais situações seguiu a lógica nos dois movimentos, ou seja, quanto maior o avanço maiores valores de Ra são

encontrados. Michalic et al (2014) no estudo do sentidos (concordante e discordante) durante o fresamento de topo na usinagem do ABNT 1045 obteve maiores rugosidades no movimento discordante e a medida que aumentaram o avanço os valores de R_a aumentaram nos dois movimentos.

5.2 Forças de usinagem

Foram estudadas as forças durante o comprimento usinado, variando três valores de avanço de corte (0.03, 0.018 e 0,04 mm/aresta) e dois sentidos (concordante e discordante), a v_c de 15 m/mm foi constante, utilizando-se dos valores das forças geradas nos intervalos de 80, 400, 800,1200 e 1600 mm usinados, detectando influência do desgaste da ferramenta e dos movimentos (discordante e concordante) na variação das forças. Os resultados estão apresentados nos gráficos a seguir.

$$f_z = 0,018 \text{ mm / aresta}$$

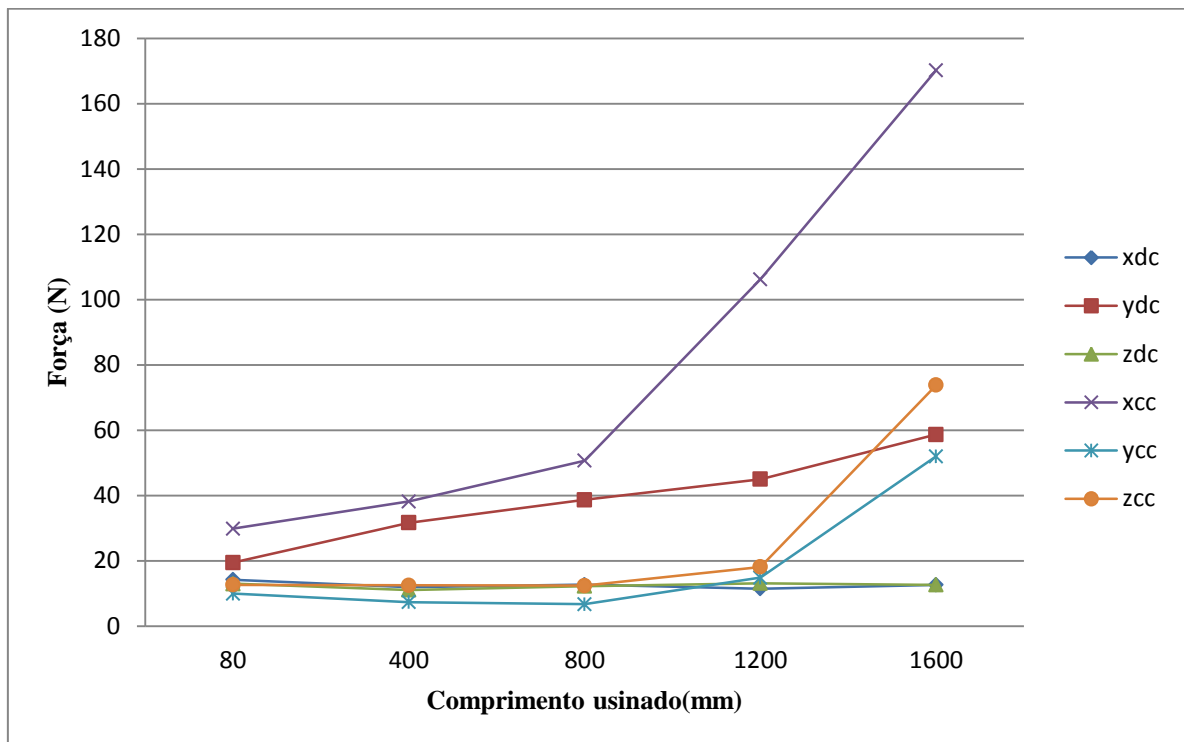


Figura 39- Gráfico das forças de fresamento em função do comprimento usinado nos intervalos de 80, 400, 1200 e 1600 mm entre movimento discordante e concordante.

Fonte: O autor.

Para o avanço de 0,018 mm/aresta observa-se que sempre há uma tendência para aumento das forças ao percorrer o comprimento usinado, que é explicado ao efeito do desgaste da ferramenta que foi bem significativo neste parâmetro. Para força F_x no sentido concordante houve maiores forças em relação aos outros sentidos e aumentando mais significativamente a partir de 1200 mm de percurso da ferramenta, fato este devido ao desgaste mais severo da ferramenta nestes parâmetros.

$$f_z = 0,03 \text{ mm / aresta}$$

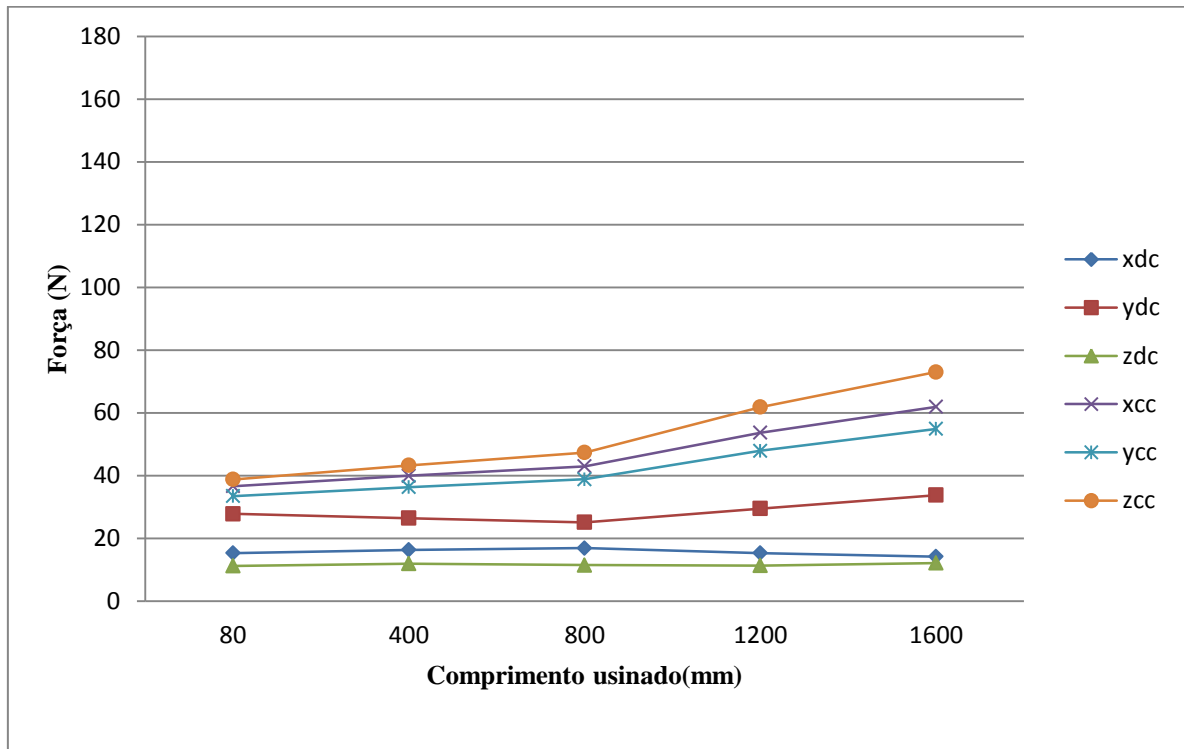


Figura 40 - Gráficos das forças de fresamento em função do comprimento usinado nos intervalos de 80, 400, 1200 e 1600 mm entre movimento discordante e concordante.

Fonte: O autor.

Para o avanço de 0,03 mm/aresta também se observa uma tendência para aumento das forças ao percorrer o comprimento usinado, devido ao desgaste da ferramenta. Sendo também a força F_x no sentido concordante que teve uns dos maiores valores e aumentando mais significativamente a partir de 1200 mm de percurso da ferramenta.

$$f_z = 0.04 \text{ mm / aresta}$$

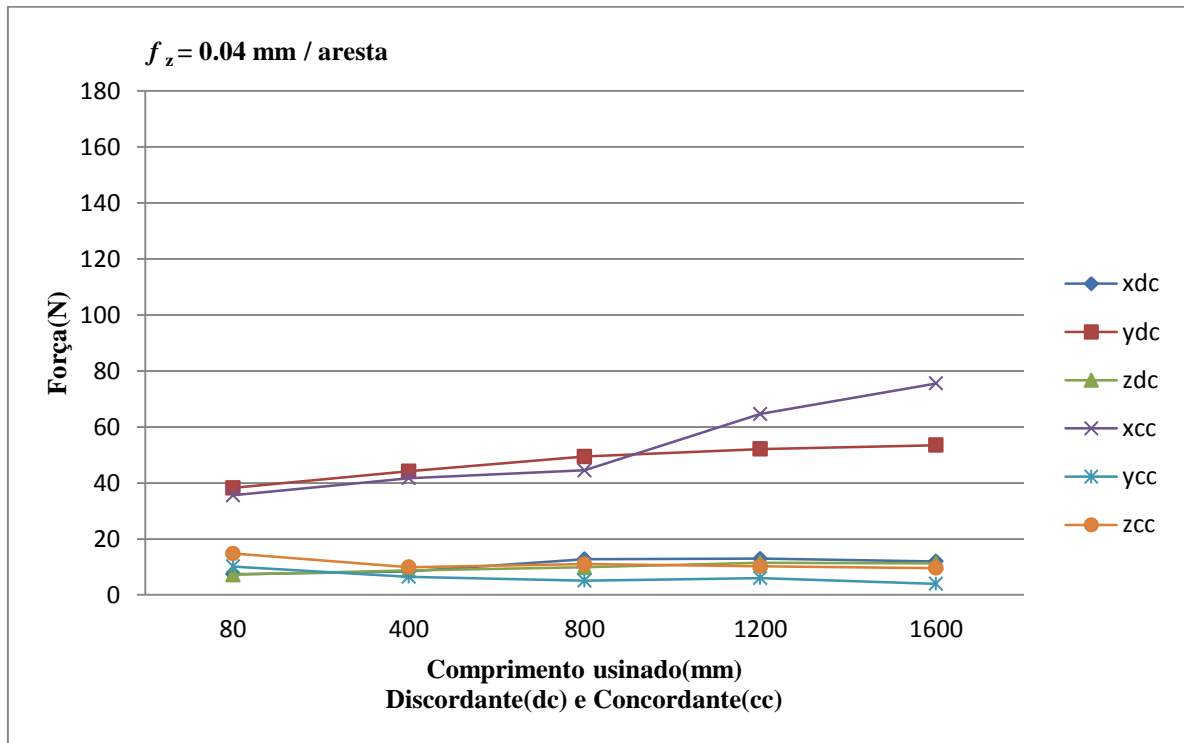


Figura 41 – Gráficos das forças de fresamento em função do comprimento usinado nos intervalos de 80, 400, 1200 e 1600 mm entre movimento discordante e concordante na força F_x .

Fonte: O autor.

Para o avanço de 0,04 mm/aresta também se observa uma tendência para aumento das forças ao percorrer o comprimento usinado, devido ao desgaste da ferramenta. Sendo mais uma vez a força F_x no sentido concordante o maior valor e aumentando mais significativamente a partir de 1200 mm de percurso da ferramenta..

Observa-se que em todos os ensaios com todos os avanços utilizados sempre há uma tendência para aumento das forças ao percorrer o comprimento usinado devido o desgaste da ferramenta que começa a perder seu gume de corte ideal passando a ter maior área de contato com a peça. À medida que o desgaste de flanco aumenta, a área de contato com a peça também aumenta e consequentemente as forças também aumentam (Josic et al, 2012). Também se observa uma maior predominância da maior força no movimento concordante. Teste realizado por Zhang et al.,(2015) na usinagem do AISI 1045 mostraram o mesmo resultado, ele atribuiu isto a forma de como a aresta de corte toca na peça no sentido concordante.

Foram analisadas as forças de avanço F_x geradas para cada avanço de corte aplicado nos sentidos concordante e discordante, conforme demonstra gráfico abaixo.

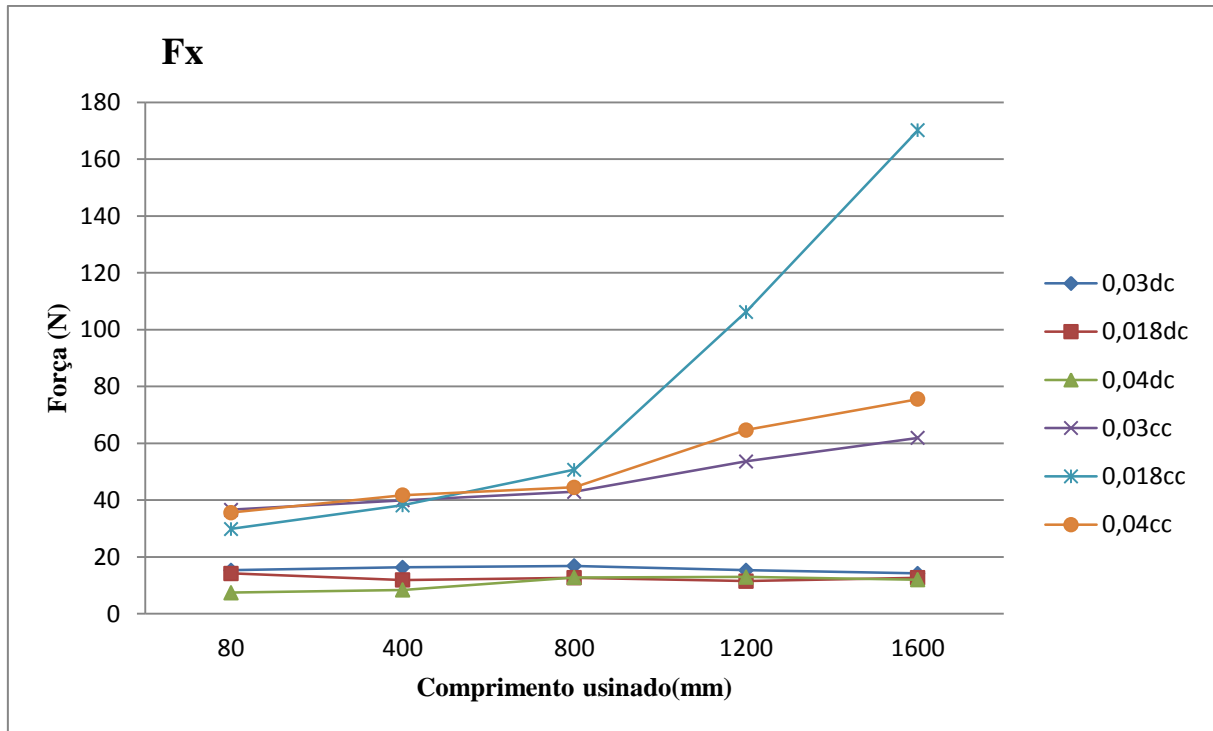


Figura 42 – Gráficos da força de avanço F_x de fresamento em função do comprimento usinado e avanços dos movimentos discordante e concordante.

Fonte: O autor

Na força F_x pode-se notar que quanto menor o avanço maiores forças foram encontradas, o que se justifica pelo desgaste mais severo da ferramenta, no o avanço de corte mais baixo a ferramenta fica mais tempo em um mesmo ponto ocasionando grande atrito e geração de calor que se resulta em desgaste severo e conseqüentemente maiores forças no decorrer da usinagem. Este desgaste mais severo nesta circunstancia ficam comprovados nas imagens do desgaste total da ferramenta que irão ser demonstradas nos tópicos a seguir.

Em relação ao sentido de corte (concordante e discordante) pode notar que o movimento concordante obteve maiores valores, podendo ser explicado de como o dente da fresa toca a peça no sentido da força F_x , como neste movimento a espessura de corte começa com valor total e depois vai reduzindo até zero, este inicio de corte com espessura de corte total ocasiona maior força no sentido da força F_x , ao contrário do sentido discordante que começa com espessura zero e depois vai crescendo progressivamente, obtendo mais suavidade na entrada do corte e conseqüentemente gerando menos forças.

Foram analisadas as forças de apoio F_y geradas para cada avanço de corte aplicado nos movimento concordante e discordante, conforme apresentado no gráfico abaixo.

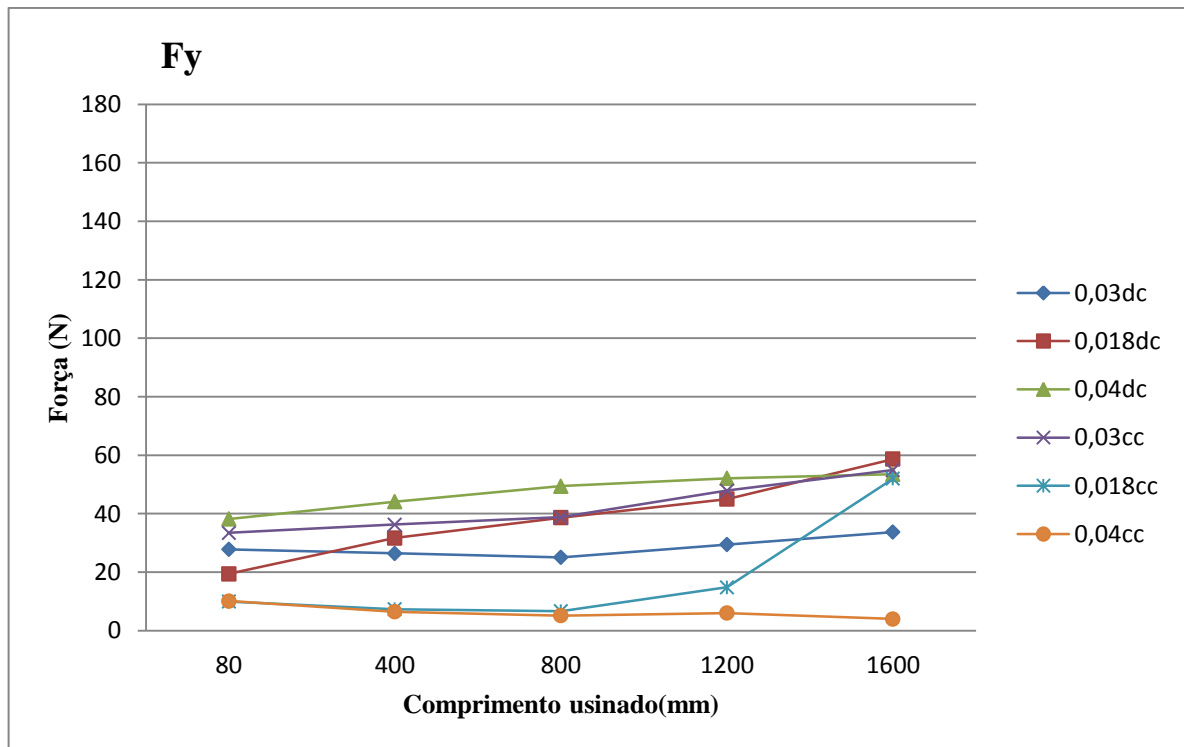


Figura 43 - Gráfico das Forças de apoio F_y de fresamento em função do comprimento usinado e avanços dos movimentos discordante e concordante.

FONTE: O autor

Na força de apoio F_y também mostrou uma tendência de um menor avanço está relacionada com maiores forças gerada que também está relacionado com o desgaste da ferramenta.

No sentido do avanço discordante apresentou maiores forças encontradas, que se explica analisando o conceito de movimento discordante, que se inicia com valor zero e vai aumentando progressivamente, como foi visto anteriormente este mecanismo provoca maior atrito e gera uma superfície endurecida por encruamento provocada pela deformação plástica ocorrida na passagem do dente da fresa anterior, sendo a entrada da aresta da fresa tocando na peça no sentido y da máquina, superfície endurecida, solicitando assim uma maior força necessária para cisalhar o material, que se reflete gerando maior força de apoio F_y .

Foram analisadas as forças passiva F_z geradas para cada avanço de corte aplicado nos movimento concordante e discordante, conforme demonstra gráfico abaixo.

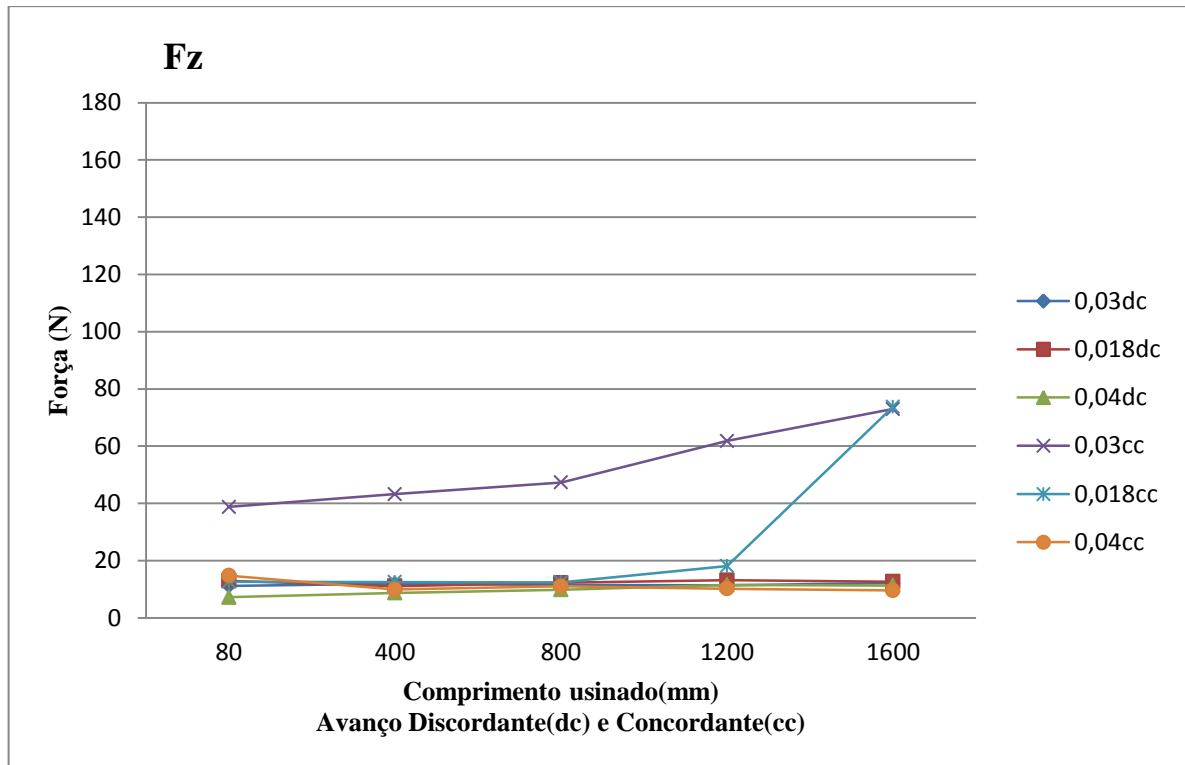


FIGURA 46 - Força passiva F_z de fresamento em função do comprimento usinado e avanços dos movimentos discordante e concordante.

FONTE: O autor

Na força passiva F_z também mostrou uma tendência de um menor avanço está relacionada com maiores forças gerada que se deve também pelo desgaste da ferramenta.

Para o sentido concordante foram encontradas maiores forças, que é explicado devido o grande desgaste da ferramenta produzido neste movimento. Assim a medida que a usinagem foi prosseguindo e o desgaste aumentando a forças também aumentaram no sentido.

5.3 Desgastes da ferramenta.

Depois do fresamento com um percurso de avanço de 1600 mm de usinagem nos ensaios para monitoramento das forças envolvidas e medição da rugosidade, foi dado sequencia na usinagem para analisar o desgaste da ferramenta comparando os dois movimentos (discordante e concordante) e avanços de corte utilizados. Foram realizadas

imagens por MEV para analisar o tipo, mecanismo e tamanho do desgaste ocorridos nas arestas da fresa utilizadas e ensaio EDS para verificar possível desgaste por adesão.

A medição dos desgastes foi realizada tendo com referência a superfície de folga da fresa nova até a ponta da aresta e assim pode ser mesurando o desgaste, como está apresentado na figura 43.

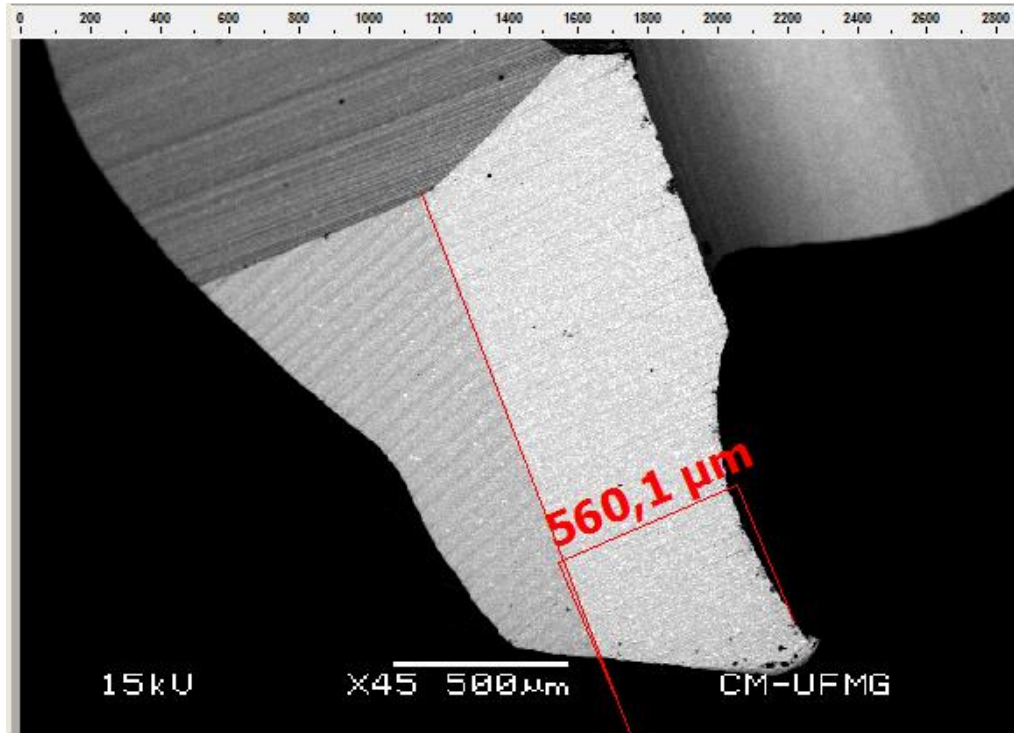


Figura 44 - Medição da aresta nova.

Fonte: O auto

Depois da medição da aresta nova foram realizadas as medições da aresta de corte na condição de desgastadas. As figuras 45, 46 e 47 apresentam o desgaste e a distancia percorrida pela ferramenta nos dois movimentos.

1º Ensaio

$V_c = 15$ m/min

$f_z = 0,018$ mm/aresta

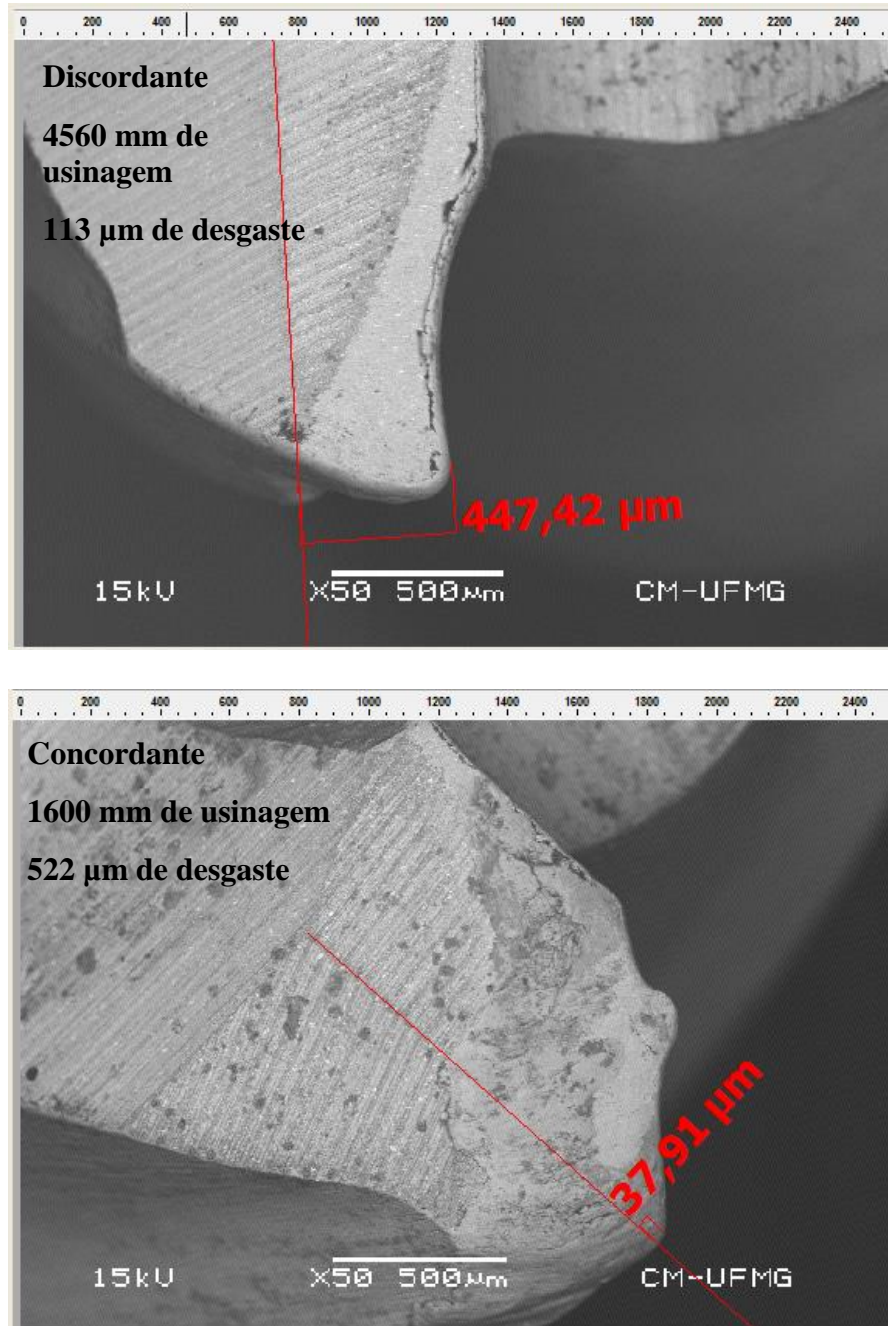


Figura 45 - Medição do desgaste da aresta de corte.

Fonte: O autor

Os resultados encontrados nos mostra claramente um desgaste bem severo quando utilizamos o sentido concordante, que apontou o maior desgaste de $522\mu\text{m}$ ultrapassando o limite de desgaste de flanco médio de $VB_B=0,3\text{mm}$ (Machado et al. 2015), este desgaste mais severo sugere deflexão da ferramenta que é mais intenso no movimento concordante e também por que em avanços menores a ferramenta fica em contato mais prolongado com a peça criando grande atrito e conseqüentemente tendo maiores temperaturas. Com isso o percurso percorrido pela ferramenta foi bem maior no movimento discordante.

2º ensaio

$V_c = 15$ m/min

$f_z = 0,03$ mm/aresta

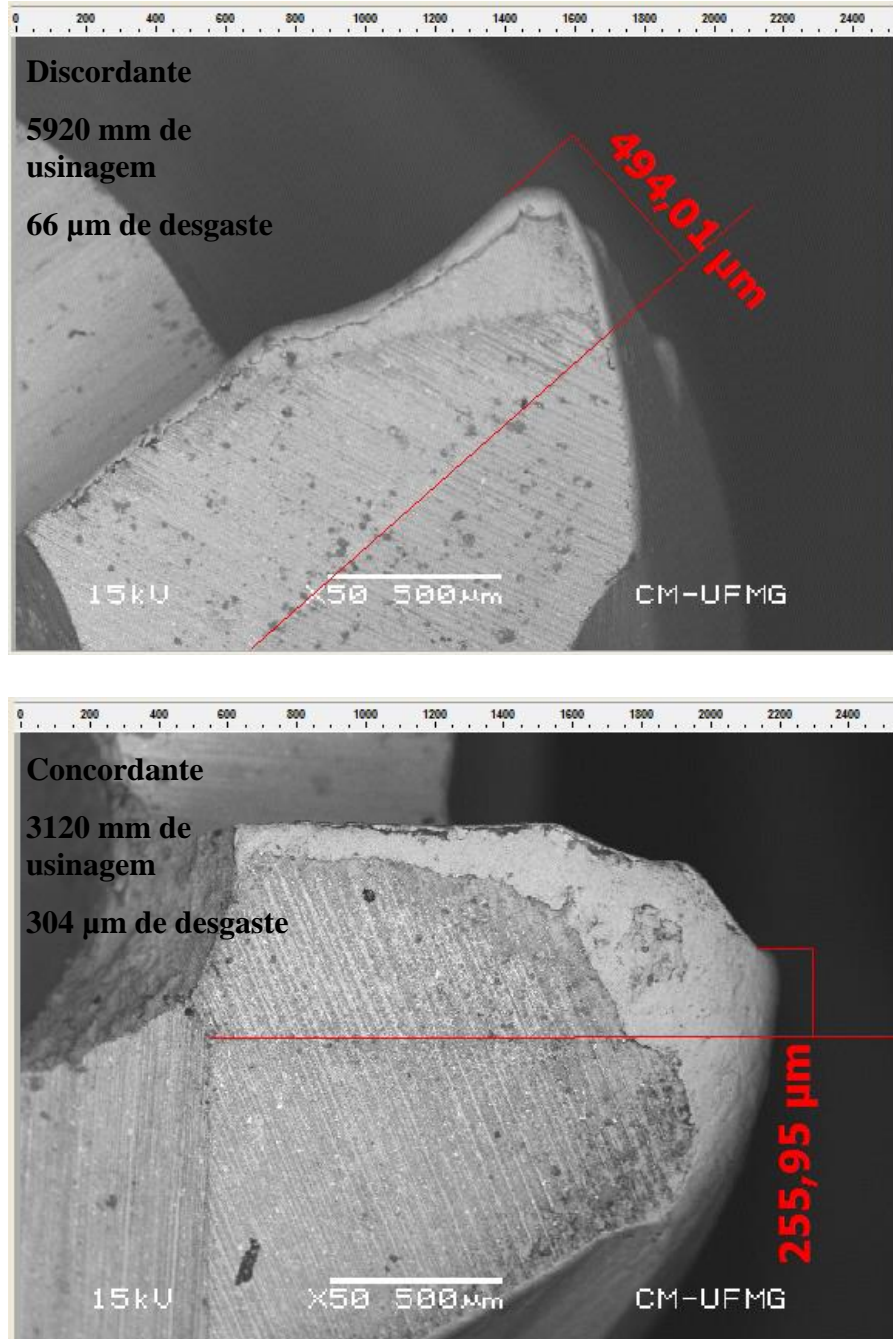


Figura 46 - Medição do desgaste da aresta de corte.

Fonte: O autor

Os resultados encontrados nos mostra um desgaste bem severo quando utilizamos o sentido concordante, o que sugere também deflexão da ferramenta que é mais intenso no movimento concordante em relação ao discordante, avanço continua sendo responsável também pelo desgaste severo permanecendo a ferramenta por um tempo mais prolongado com a peça criando grande atrito. Com isso o percurso percorrido pela ferramenta foi maior no movimento discordante.

3º Ensaio

$v_c = 15$ m/min

$f_z = 0,04$ mm/aresta

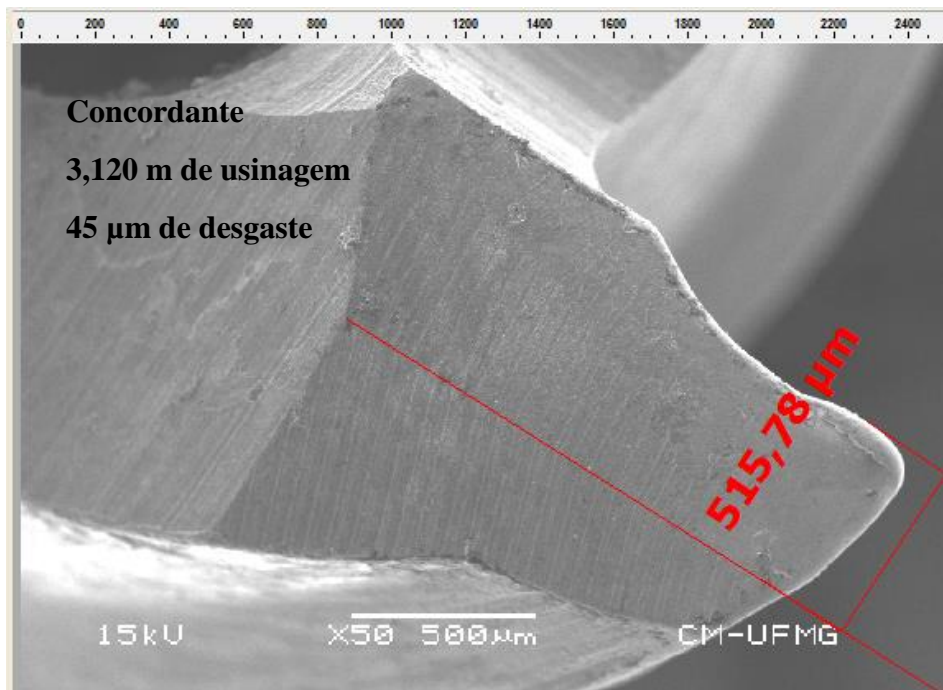
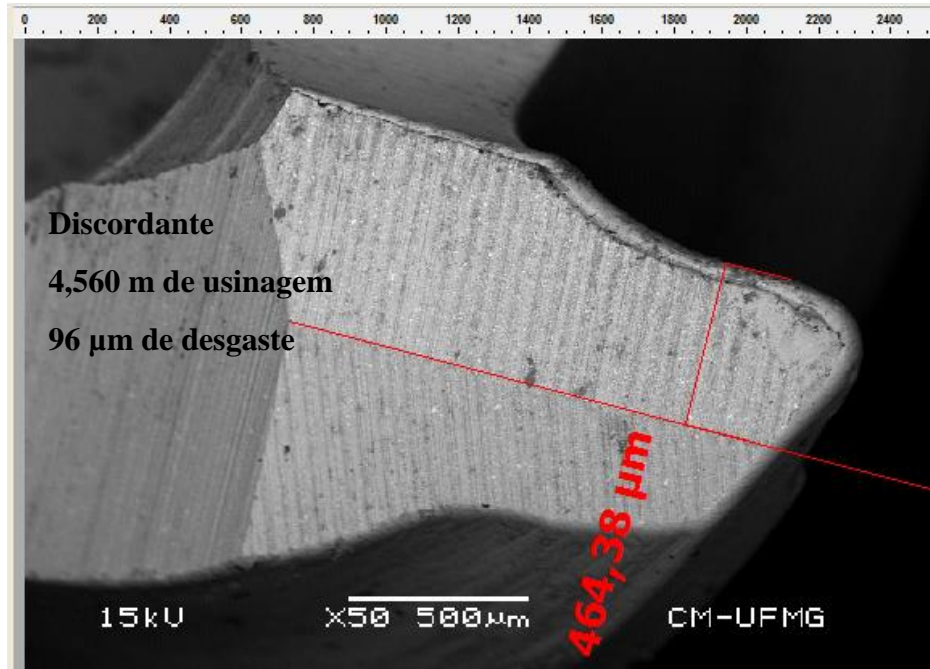


Figura 47 - Medição do desgaste da aresta de corte.

Fonte: O autor

Para o avanço de 0,04 obtivemos um desgaste um pouco maior no discordante em relação ao concordante, neste caso sendo maior o avanço em relação aos outros o desgaste não foi afetado significativamente durante o movimento concordante. A ferramenta teve um percurso maior no movimento discordante, com estes parâmetros e os resultados foram similares nos dois movimentos.

O gráfico apresenta o desgaste da ferramenta comparando os dois movimentos (discordante e concordante).

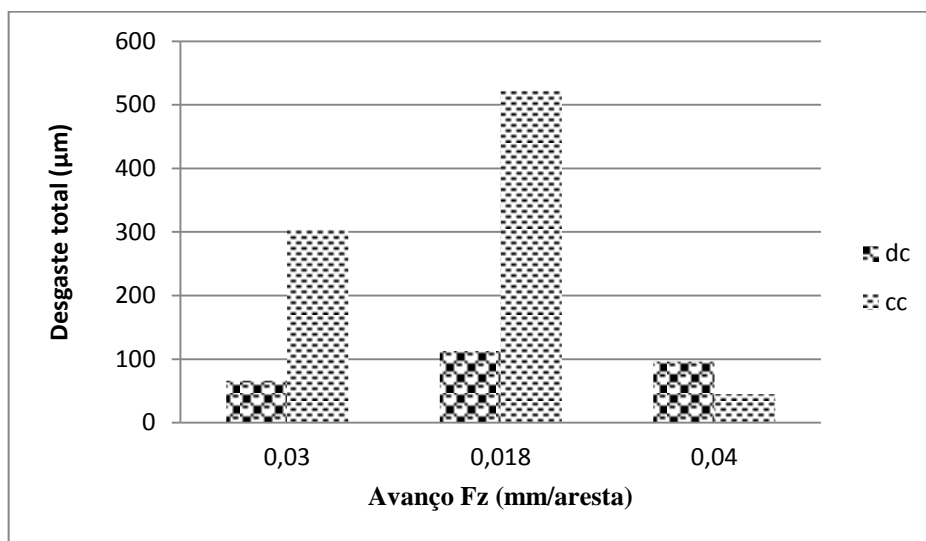


Figura 48 - Gráfico do desgaste por avanços ocorridos nos dois movimentos.

Fonte: O autor

Quando se compara os movimentos, observa-se que movimento concordante gerou um maior desgaste para quase todos os avanços utilizados, o que deve-se atribuir a deflexão da fresa, que ocorre nos dois movimentos, mas no concordante ele fica mais evidenciado pela forma de como a aresta de corte toca a peça (ângulo de entrada), o que a literatura chama de *tempo de choque*, ou seja, é o tempo gasto da aresta entre o primeiro contato e o contato por completo com a seção do cavaco, o ideal é que este tempo seja o maior possível para que o choque na aresta seja o menor possível e de forma gradual. A duração do impacto de entrada da aresta de corte é essencial para as cargas geradas na ferramenta de fresamento (BOUZAKIS et al., 2012). Para que isso aconteça o recomendado é que a linha de centro da fresa esteja dentro da largura da peça, para que o contato aresta/peça seja gradual evitando impactos fortes e vibrações.

Neste estudo o centro da fresa foi localizado exatamente na quina da peça, pelo motivo para qual não permita que os dois movimentos (discordante e concordante) ocorram simultaneamente, visto se usasse o centro da fresa dentro da peça isto aconteceria e prejudicaria as avaliações dos ensaios. Então, com centro da fresa na quina da peça se forma um ângulo de entrada nulo, a aresta toca em cheio a peça, isso ocasiona um forte choque na fresa o que a faz vibrar e fletir sucessivamente durante a usinagem, ocasionando vibrações que resultam em um desgaste mais severo, agravado pelo mecanismo do movimento concordante que inicia-se com espessura de corte total, com isso cria-se grande impacto na entrada ao contrário do discordante que começa de zero até espessura total se tornando a entrada de forma gradual. Através de simulação (FEM) Bouzakis et al.(2012) apresentam na figura 49 a duração de impacto de entrada em relação ao comprimento do cavaco não deformado nos movimentos discordante e concordante. Conclui-se que o tempo de duração do impacto de entrada da aresta de corte é menor no movimento concordante, portanto, neste movimento o choque é maior.

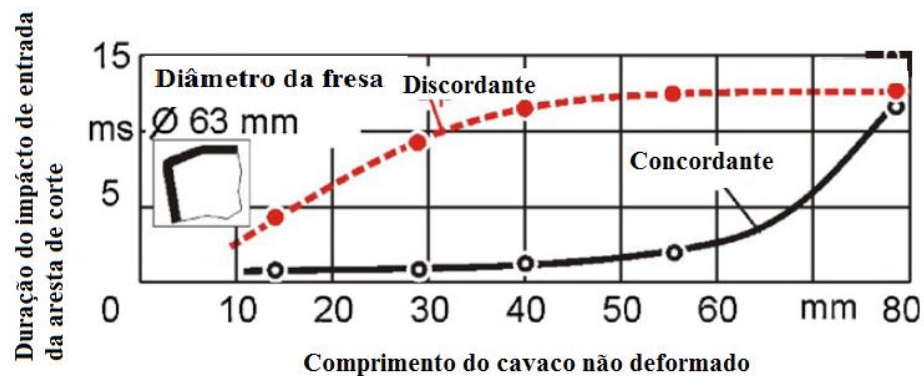


Figura 49 - Tempo de impacto da aresta de corte no movimento concordante e discordante.

Fonte: Bouzakis et al.(2012)

Esta entrada abrupta da ferramenta na peça ocorrida nos ensaios durante o movimento concordante sugere que foi a responsável pela vibração, desgaste severo e suas consequências.

Nos gráficos a seguir foi analisado a distancia percorrida pela ferramenta e tamanho do desgaste comparados com seus respectivos avanços.

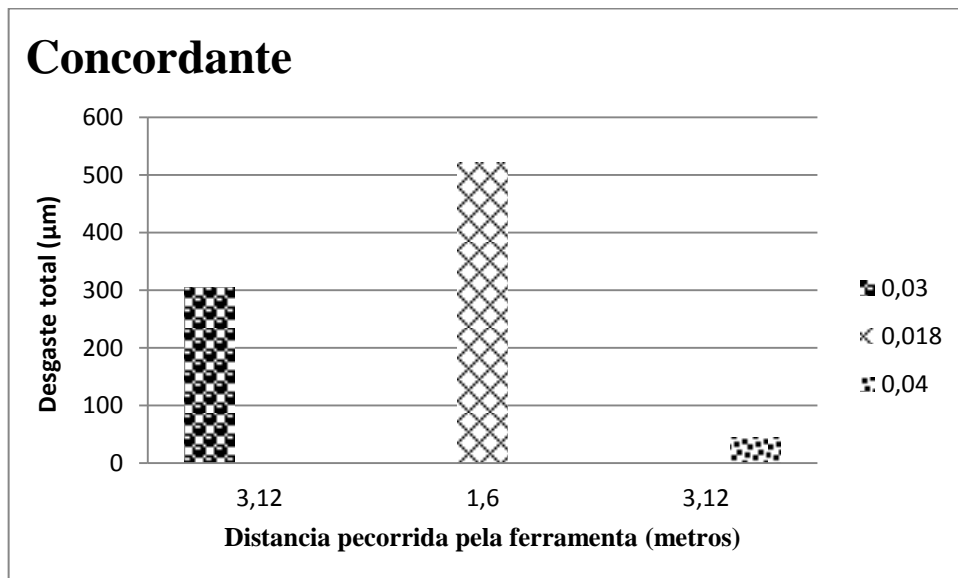
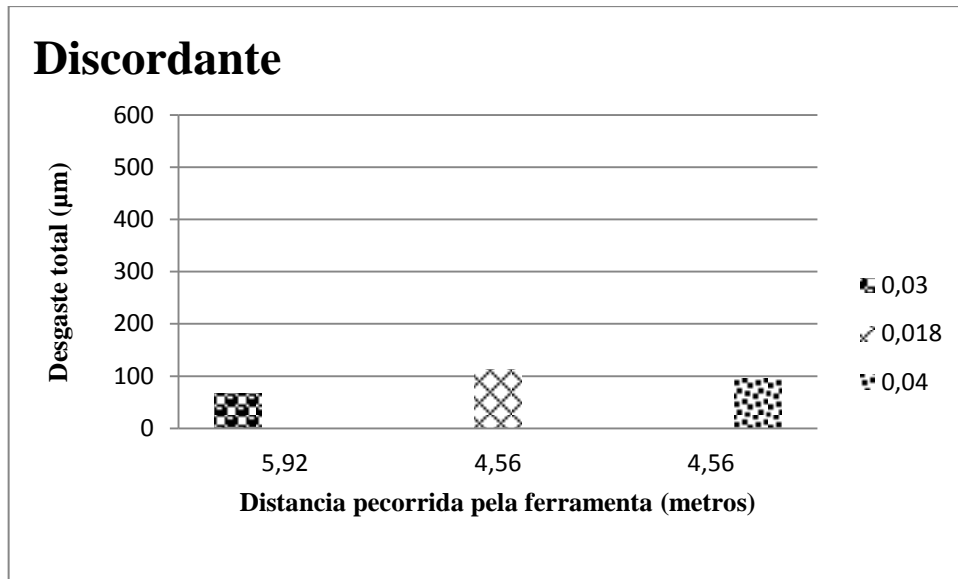


Figura 50 - Desgaste da ferramenta e distancia percorrida.

Fonte: O autor

A figura 50 permite avaliar que o desgaste maior com menor distancia percorrida pela ferramenta durante a usinagem se apresenta no menor avanço e no movimento concordante, justificado pelo grande atrito presente em avanços menores e consequentemente maiores temperaturas resultando em maior desgaste e pela deflexão maior da ferramenta presente no movimento concordante. Michalick et al., (2012) na usinagem do 1045 para fabricação de moldes com cavidade profundas, identificou se utilizar fresa de topo com sua aresta de corte periférico totalmente em contato com a parede sendo formada durante a usinagem provocaria

vibrações, ele sugere que esta vibração é devida ao contato prolongado com a aresta periférica da ferramenta com a parede sendo formada durante a usinagem. Como solução Michalick et al., (2012) propôs usar uma fresa cilíndrica com rebaixo, assim teria uma aresta periférica menor e conseqüentemente menor contato com a parede sendo formada conforme apresentado na figura 50.

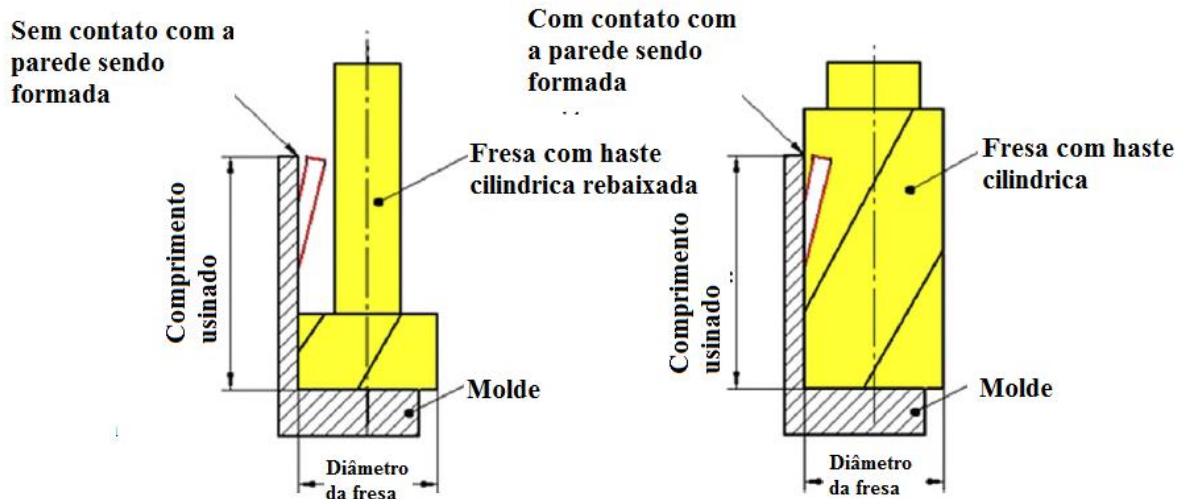


Figura 51 – Desenho esquemático da operação de fresamento com fresa cilíndrica com e sem rebaixo.

Fonte: Michalick et al., (2012)

Isto sugere que nos ensaios realizados neste trabalho o contato prolongado com a aresta periférica de corte pode ter sido responsável pela deflexão da ferramenta tendo como consequência vibração e desgaste severo da ferramenta, tendo influenciado também na força e rugosidade final. Quando utilizado o movimento concordante os reflexos desta deflexão da ferramenta são mais evidentes pela forma de como a aresta de corte toca na peça.

5.4. Tipo e mecanismo de desgaste

5.4.1 Desgaste abrasivo

A figura 52, 53 e 54 encontra-se o desgaste da ferramenta no movimento concordante e seus respectivos avanços.

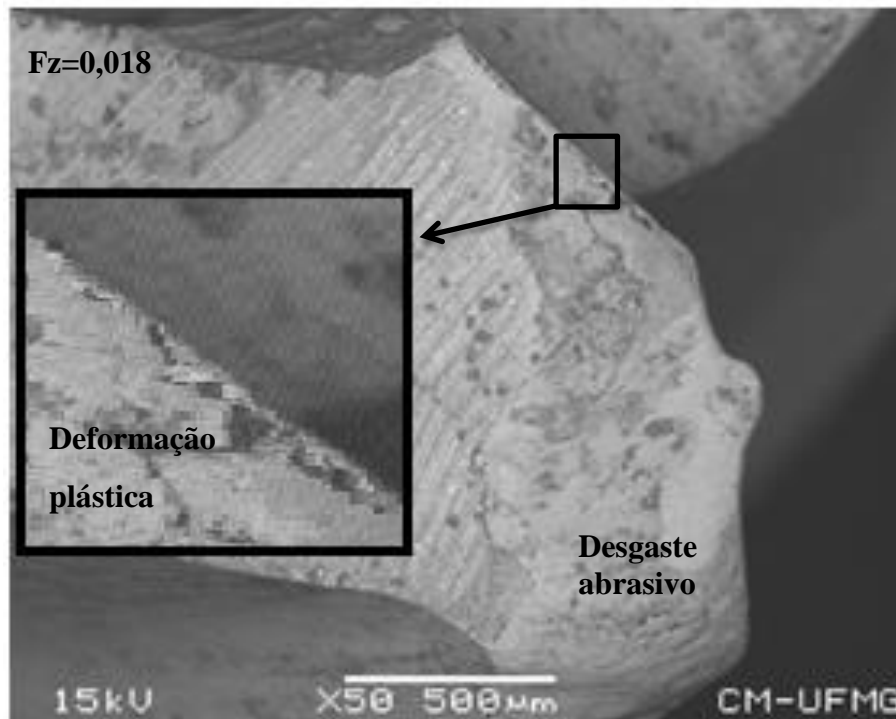


Figura 52 - Desgaste da ferramenta no movimento concordante.

Fonte: O autor

Para o avanço de 0,018 mm/ aresta foram encontrado o desgaste de flanco por abrasão com grande perda de massa, que é explicado pelo fato que em menores valores de avanço houve maior atrito com alta temperaturas que resultou no desgaste por abrasão. Outro fator importante é a ferramenta de aço rápido que não tem característica de boa resistência ao desgaste em alta temperatura. Foi percebido uma deformação plástica após um desgaste bem acentuado no flanco da ferramenta, que ocorreu a medida que desgaste foi se desenvolvendo e chegando a tal ponto passou a carregar muito aresta de corte de forma compressiva e assim desenvolvendo a deformação plástica.

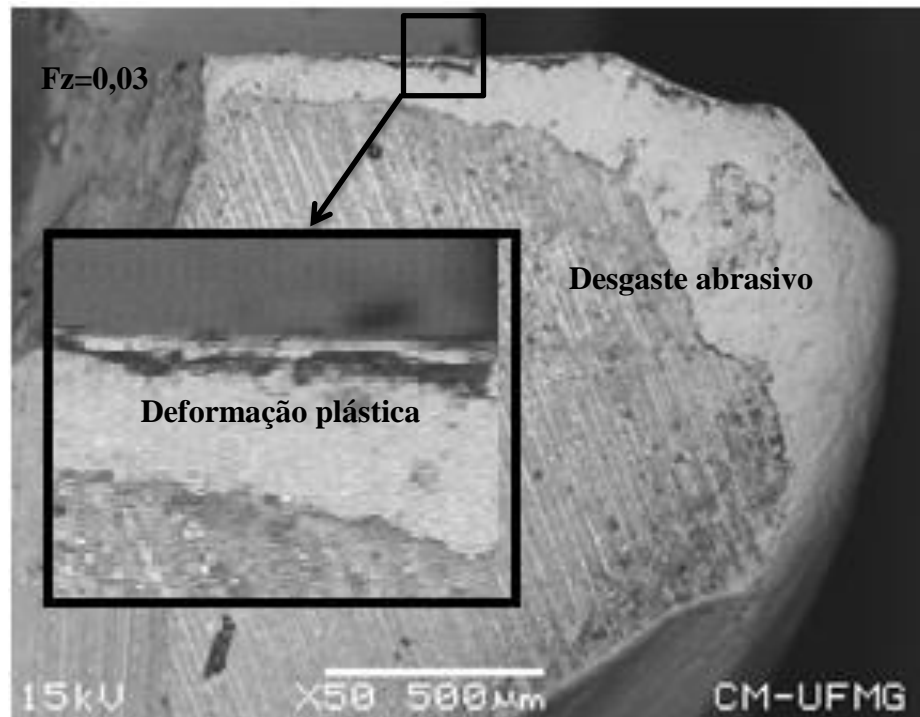


Figura 53 - Desgaste da ferramenta no movimento concordante.

Fonte: O autor

Para o avanço 0,03 mm/ aresta encontramos resultados parecidos do 0,018 mm/aresta, detectando grande desgaste abrasivo e pequena deformação plástica o que podemos atribuir aos mesmos motivos. Uma pequena redução do desgaste abrasivo que foi proporcional com o aumento do avanço.

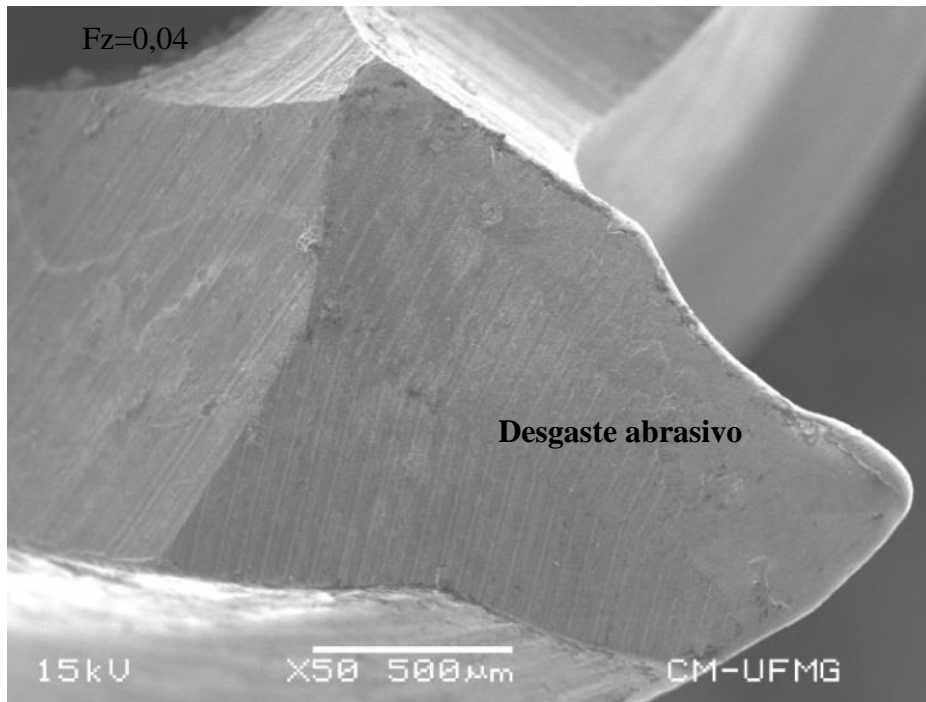


Figura 54 - Desgaste da ferramenta no movimento concordante.

Fonte: O autor

Para o avanço de 0,04 foi encontrado pequeno desgaste abrasivo, o que corrobora de que quanto maior o avanço menor o desgaste.

Durante a usinagem do aço H13 (utilizado em matrizes a trabalho a quente) com fresa de topo de metal duro, Toh (2004) encontrou resultados parecidos, desgaste mais acentuado quando utilizou o movimento concordante, que atribui a maior temperatura ocorridos neste movimento, sugerindo uma possível explicação que foi devido ao desgaste da cratera adjacente ao flanco, aumentando o ângulo de inclinação efetivo com isso o desgaste da ferramenta também aumentou.

5.4.2 Deformação plástica

As figuras 55,56 e 57 apresentam o desgaste da ferramenta no movimento discordante e seus respectivos avanços.

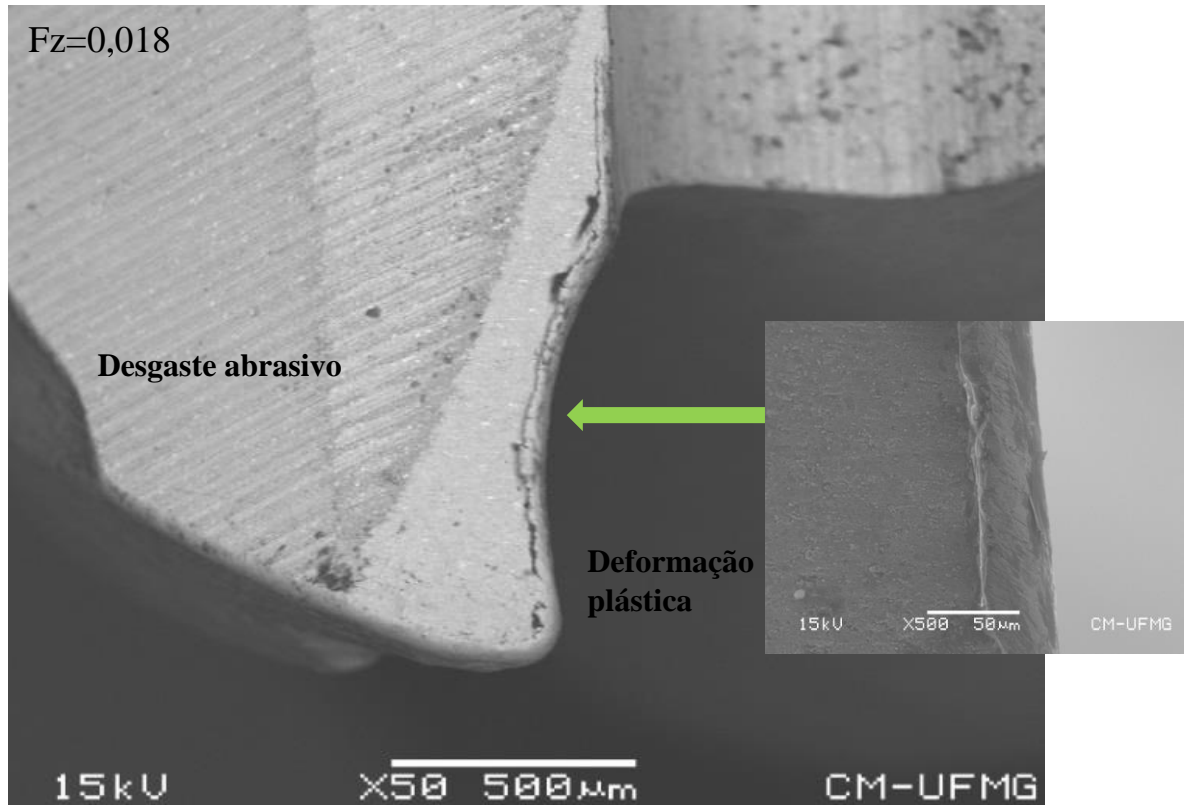


Figura 55 - Desgaste da ferramenta no movimento discordante.

Fonte : O autor

Para o avanço 0,018 prevaleceu o desgaste por deformação plástica, ocorreu desgaste abrasivo de forma moderado dentro dos níveis de desgaste aceitáveis ($VB_B=0,3\text{mm}$), o que corresponde para o movimento discordante o menor desgaste devido a menores temperaturas em relação ao concordante.

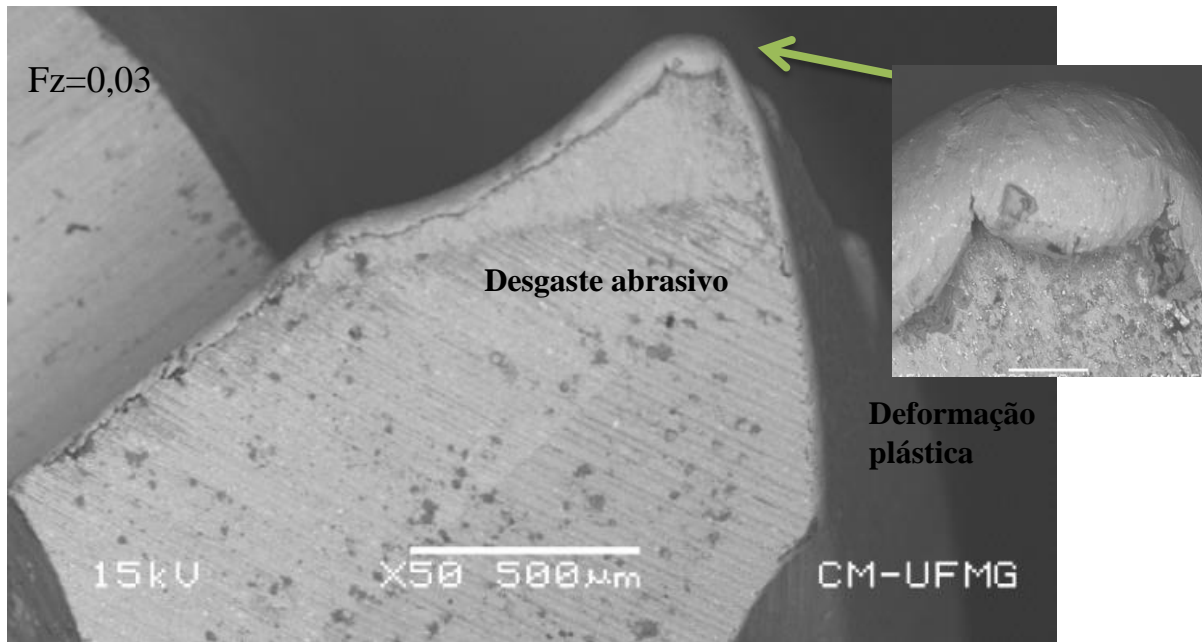


Figura 56 - Desgaste da ferramenta no movimento discordante.

Fonte : O autor

Para o avanço 0,03 também prevaleceu o desgaste por deformação plástica e desgaste abrasivo de forma moderada.

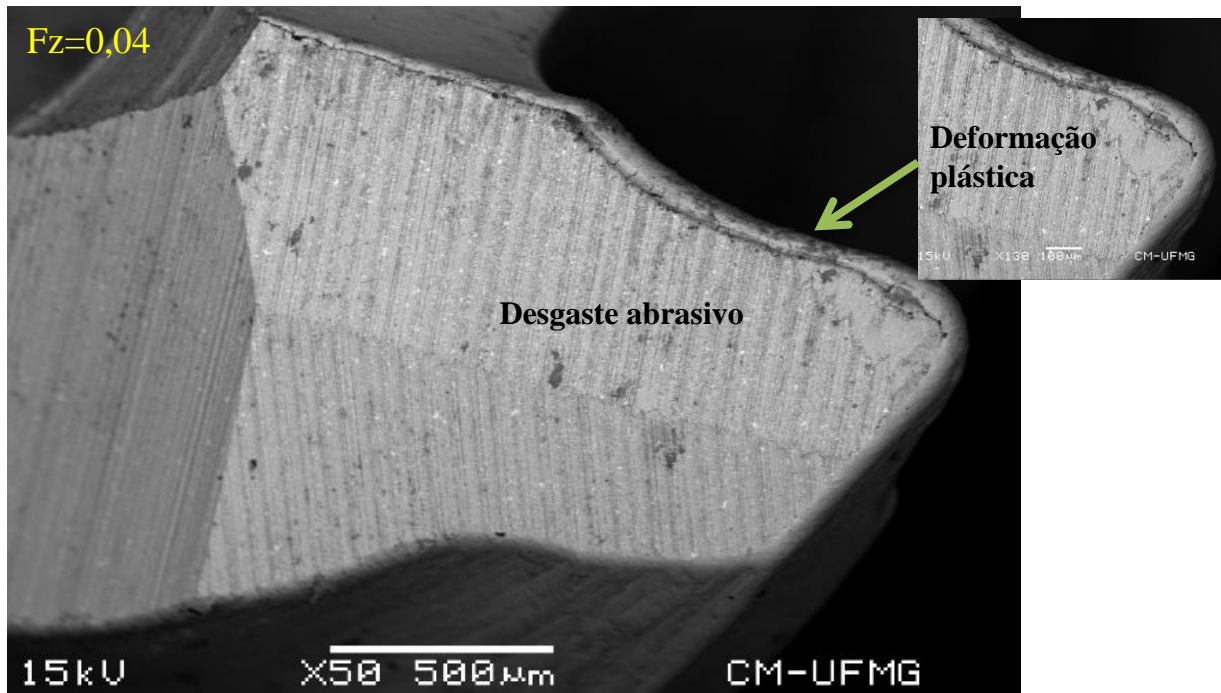


Figura 57 - Desgaste da ferramenta no movimento discordante.

Fonte: O autor

Para o avanço 0,04 também prevaleceu o desgaste por deformação plástica e desgaste abrasivo de forma moderada.

Com temperatura mais baixa durante o movimento discordante, o mecanismo de desgaste por deformação plástica passou a ser significativo. Porque no movimento discordante há um forte atrito entre ferramenta e peça no início do corte, esta pressão inicial provoca também deformação plástica na aresta de corte principalmente quando se usa ferramenta de aço rápido que tem como característica alta tenacidade ao invés de ocorrer somente o desgaste abrasivo passa também a ocorrer deformação plástica.

6 CONCLUSÃO

6.1 Rugosidade

- A rugosidade se apresentou mais alta no movimento concordante quando utilizado o avanço de menor valor (0,018 mm/aresta).

6.2 Forças durante o fresamento

- Foi registrado o aumento das forças de usinagem em todos os sentidos e avanços no decorrer do comprimento usinado devido o desgaste da ferramenta.
- A força de avanço (F_x) foi a que apresentou maiores valores em todos os avanços e durante o movimento concordante.

6.3 Desgaste da ferramenta.

- O movimento concordante apresentou um desgaste de flanco mais severo em relação ao concordante, sendo:

6.3.1 Desgaste abrasivo

- Menores avanços utilizados juntamente com o movimento concordante resultaram em desgaste abrasivo severo com pequena deformação plástica resultado da possível deflexão da ferramenta gerando vibração utilizada neste movimento.

6.3.2 Deformação plástica

- No movimento discordante ocorreu deformação plástica com desgaste abrasivo moderado. A ocorrência de deformação plástica pode ser atribuída a tenacidade da ferramenta que sofre uma forte atrito no início do corte que pode fazer escoar material da ferramenta resultando em deformação.

6.5 Conclusão geral

- Ao iniciar um fresamento deve-se levar em conta o sentido de avanço (concordante e discordante) para maximizar os bons resultados no que tange qualidade, custo e produtividade.
- Na operação de fresamento, quando o rebaixo é profundo aumentando assim o balanço da ferramenta a vibração existente devido a deflexão da ferramenta tende a ser maior.
- Para bom acabamento em fresamento de rebaixo será melhor o movimento discordante.
- Se for utilizar o concordante em usinagem de rebaixo a deflexão da ferramenta deve ser considerada, pois neste movimento o desgaste da ferramenta é mais severo.
- Avanços menores nesta situação aceleram o desgaste da ferramenta sendo predominante o desgaste abrasivo.
- A rugosidade foi muita afetada pela deflexão da ferramenta.
- Para a usinagem de rebaixo o movimento mais indicado é o discordante, porque provém menos desgaste da ferramenta e um melhor acabamento.
- No concordante o desgaste predominante foi o abrasivo e no discordante foi a deformação plástica.

7 SUGESTÕES PARATRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas sugestões que podem enriquecer e dar continuidade ao trabalho desenvolvido até o momento. Como propostas para trabalhos futuros seguem-se:

- realizar medição da temperatura e ensaios com diferentes velocidades de corte para verificar, a influência da mesma sobre o desgaste da ferramenta.
- analisar os esforços de corte variando os números de arestas cortantes da fresa, assim espera-se, uma intermitência de corte mais estabilizada conseguida por meio de um número maior de aresta de corte.
- utilizar fluido de corte durante os ensaios, devido a capacidade de lubri-refrigeração do fluido que pode ser influenciadora no desgaste de ferramenta.
- analisar o estado de tensão residual da superficial usinada nos sentidos concordante e discordante e verificar a influência dos parâmetros de entrada nos valores de tensão residual.
- realizar ensaios variando a dureza do material usinado e verificar sua verdadeira influência nos sinais de forças de usinagem, rugosidade e desgaste de ferramenta.

9 REFERÊNCIAS

- ALAUDDIN, M.; MAZID, M.A.; BARADI EL, M.A.; HASHMI, M.S.J. Cutting forces in the end milling of Inconel 718. **Journal of Materials Processing Technology**, 1998.
- ASM International, Volume 16. **Machining Process**. 10th ed., 1990.
- BAYLY, P. V.; INSPERGER, T.; MANN, B. P.; STE, G. Stability of up-milling and down-milling, part 1: alternative analytical methods. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2003.
- BERNADOS, P. G.; VOSNIAKOS, G. C. Predicting surface roughness in machining: a review. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2003.
- BOUZAKIS, B.; MAKRIMALLAKIS, S.; KATIRTZOGLU G.; BOUZAKIS E.; SKORDARIS, G.; MALIARIS, G.; GERARDIS, S. Coated tools' wear description in down and up milling based on the cutting edge entry impact duration. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, 2012.
- Dib, M. H. M.; BENJAMIN, G. M.; JASINEVICIUS, R. G. Uma Análise Experimental do Fresamento Discordante e Concordante. **Revista Iuminart**, 2015.
- DIN-4760. Form Deviations; Concepts; Classification System, (1982).
- DIN-844.Werkzeuge 7 ; Taschenbuch 167.Berli, Beuth Verlag, (1982)
- DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI,N.L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8ed. São Paulo: Artliber, 2013.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.
- HADI, M. A.; GHANI, J.A.; HARON CHE, C. H.; KASIM, M.S. Comparison between up-milling and down-milling operations on tool wear in milling Inconel 718. **Procedia Engineering**, 2013.
- HUTCHINGS, I.M., Shipway, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. 2 ed. Butterworth-Heinemann, 2017.
- JOZIC, S.; BAJIC, D.; TOPIC, S. Flank wear in down and up milling. **Annals of DAAAM for 2012 & Proceedings of the 23rd International DAAAM Symposium**, 2012.
- KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1 – Cutting**. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011.
- Li, H.Z.; ZENG H.; CHEN X.Q. An experimental study of tool wear and cutting force variation in the end milling of Inconel 718 with coated carbide inserts. **Journal of Materials Processing Technology**, 2006.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R.; T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MA, Y.; FENG, P.; ZHANG, J.; WU, Z.; YU, D. Prediction of surface residual stress after end milling based on cutting force and temperature. **Journal of Materials Processing Technology**, 2016.

MICHALIK, P.; ZAJAC J.; HATALA, M.; MITAL, D.; FECOVA, V. Monitoring surface roughness of thin-walled components from steel C45 machining down and up milling. **Measurement**, 2014.

MINITAB. Disponível em <http://support.minitab.com/pt-br/minitab/17/topic-library/basic-statistics-and-graphs/introductory-concepts/data-concepts/anderson-darling/>. Acesso em: 14/03/2018.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

NOURI, M.; FUSSEL, B. K.; ZINITI, B. L.; LINDER, E. Real-time tool wear monitoring in milling using a cutting condition independent method. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 2015.

RYU, S. H.; CHU, C. N. The form error reduction in side wall machining using successive down and up milling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, 2005.

SANDIVIK COROMANT. Disponível em: <http://ww.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/getting_started/general_guidelines/cutter_position. Acesso em 13/10/17).

SIMUNOVIC, G.; SIMUNOVIC, K.; SARIC, T. Modeling and simulation of surface roughness in face milling. **International Journal of Simulation Modelling**, 2013.

STEMMER, C.E. **Ferramentas de Corte II**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 3 ed., 2005.

ULUTAN, D.; ALACA, B. E.; LAZOGLU, I. Analytical modelling of residual stresses in machining. **Journal of Materials Processing Technology**, 2006.

WEINGGAERTNER, W.L., SCHROTER, R.B., Máquinas – **Ferramentas E Processos de Usinagem com Ferramenta de Geometria Definida**. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, Brasil, 2006.

WYEN, C.F.; JAEGER, D.; WEGENER, K. Influence of cutting edge radius on surface integrity and burr formation in milling titanium. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2012.

TIAN, X.; ZHAO, J.; ZHAO, J.; GONG Z.; DONG, Y. Effect of cutting speed on cutting forces and wear mechanisms in high-speed face milling of Inconel 718 with Sialon ceramic tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2013.

TOH, C. K. Comparison of chip surface temperature between up and down milling orientations in high speed rough milling of hardened steel. **Journal of Materials Processing Technology**, 2005.

ZHANG, T.; LIU Z.; XU, C. Theoretical modeling and experimental validation of specific cutting force for micro end milling. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2014.

ZOREV, N. N. **Metal Cutting Mechanics**. First English Edition. Kaisertrsse 75, Frankfurt, 1966.

ANEXO A

Certificado de composição química referente ao material dos corpos de provas

RELATÓRIO DE ENSAIOS DE ANÁLISE QUÍMICA		RELATÓRIO N°: 301/19
CLIENTE: MARCELO A. M. ALMEIDA		
PEDIDO: (Order)		
MATERIAL: (Material)	ABNT-4140	
CORRIDA: (Heat)		
EQUIPAMENTO: (Equipment)	Espectrometro Otico modelo Spectromaxx do fabricante SpectroSul, código metrológico EPL-001 e número do certificado de calibração 30072018 válido até 07/2019.	
Amostra: (Sample)	Amostra ABNT-4140	

RESULTADO DE ANÁLISE QUÍMICA (Results of Chemical Analysis)							
Elementos (Elements)	Concentração (%) (Concentration)			Elementos (Elements)	Concentração (%) (Concentration)		
	Min.	Encotrado	Max		Min.	Encotrado	Max
Carbono (C)	0.380	0.396	0.430	Tungstênio (W)	....	<0.0100	....
Silício (Si)	0.150	0.236	0.300	Chumbo (Pb)	....	<0.0030	....
Manganês (Mn)	0.750	0.831	0.900	Estanho (Sn)	....	0.0029	....
Fósforo (P)	....	0.0082	0.0250	Arsênio (As)	....	0.0048	....
Enxofre (S)	....	0.0112	0.0200	Zircônio (Zr)	....	<0.0015	....
Cromo (Cr)	0.800	0.836	1.10	Bismuto (Bi)	....	<0.0040	....
Molibdênio (Mo)	0.150	0.174	0.250	Cálcio (Ca)	....	0.00013	....
Níquel (Ni)	....	0.0306	0.250	Cério (Ce)	....	<0.0030	....
Alumínio (Al)	0.020	0.0227	0.0500	Boro (B)	....	0.00085	....
Cobalto (Co)	....	0.0098	....	Zinco (Zn)	....	<0.0020	....
Cobre (Cu)	....	0.115	....	Lantânio (La)	....	<0.0010	....
Nióbio (Nb)	....	0.0018	....	Ferro (Fe)	....	97.3	....
Titânio (Ti)	....	<0.0010	....	Antimônio (Sb)	....	<0.0010	....
Vanádio (V)	....	0.0174	0.0070	Telúrio (Te)	....	0.0022	....

LAUDO: (Conclusion)	APROVADO	
OBSERVAÇÕES: (Observation)		
	MARCÍLIO	01/07/2019
LABORATÓRIO AÇOFORJA (Açoforja Laboratory)	INSPECTOR DO CLIENTE (Customer Inspector)	DATA (Date)

APÊNDICE A – Resultado da Análise de Variância

Regressão Fatorial Geral: Rugosidade Ra versus Blocos; Avanço; Movimento

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Avanço	3	0,018; 0,030; 0,040
Movimento	2	Concordante; Discordante

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	6	16,2143	2,7024	11,21	0,009
Blocos	1	0,9380	0,9380	3,89	0,106
Linear	3	1,4099	0,4700	1,95	0,240
Avanço	2	1,2889	0,6445	2,67	0,162
Movimento	1	0,1210	0,1210	0,50	0,510
Interações de 2 fatores	2	13,8664	6,9332	28,75	0,002
Avanço*Movimento	2	13,8664	6,9332	28,75	0,002
Erro	5	1,2059	0,2412		
Total	11	17,4202			

Sumário do Modelo

S	R2	R2 (aj)	R2 (pred)
0,491093	93,08%	84,77%	60,13%

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor T	Valor-P	VIF
Constante	2,889	0,142	20,38	0,000	
Blocos					
1	-0,280	0,142	-1,97	0,106	1,00
Avanço					
0,018	0,349	0,200	1,74	0,142	1,33
0,030	-0,439	0,200	-2,19	0,080	1,33
Movimento					
Concordante	-0,100	0,142	-0,71	0,510	1,00
Avanço*Movimento					
0,018 Concordante	1,368	0,200	6,82	0,001	1,33
0,030 Concordante	-0,110	0,200	-0,55	0,608	1,33

Equação de Regressão

$$\begin{aligned}
 \text{Rugosidade Ra} &= 2,889 + 0,349 \text{ Avanço}_{0,018} - 0,439 \text{ Avanço}_{0,030} \\
 &+ 0,090 \text{ Avanço}_{0,040} - 0,100 \text{ Movimento}_{\text{Concordante}} + 0,100 \text{ Movimento}_{\text{Discordante}} \\
 &+ 1,368 \text{ Avanço*Movimento}_{0,018 \text{ Concordante}} - \\
 &1,368 \text{ Avanço*Movimento}_{0,018 \text{ Discordante}} - 0,110 \text{ Avanço*Movimento}_{0,030 \text{ Concordante}} \\
 &+ 0,110 \text{ Avanço*Movimento}_{0,030 \text{ Discordante}} - \\
 &1,258 \text{ Avanço*Movimento}_{0,040 \text{ Concordante}} + 1,258 \text{ Avanço*Movimento}_{0,040 \text{ Discordante}}
 \end{aligned}$$

Equação média sobre blocos.

Ajustados e Diagnósticos para Observações Atípicas

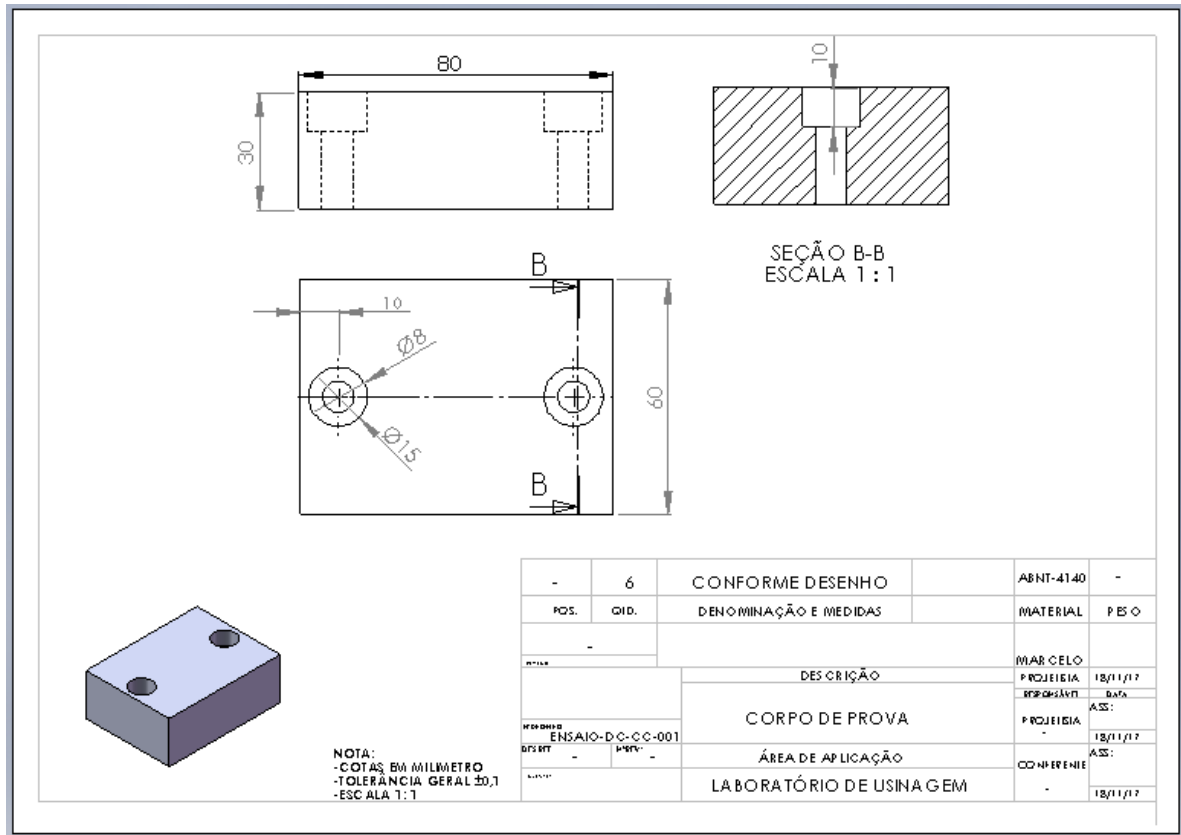
Rugosidade					
Obs.	Ra	Ajuste	Resid	Resid Pad	
3	1,260	1,960	-0,700	-2,21	R
9	3,220	2,520	0,700	2,21	R

R Resíduo grande

APÊNDICE B – Resultado das medições de Ra [μm]

Comprimento usinado (1,6 m)	Avanço (f_z)	MOVIMENTOS			
		Rugosidade Ra μm		Rugosidade Ra μm /réplicas	
		Concordante	Discordante	Concordante	Discordante
1º Parâmetro	0,018	5,419	1,683	3,413	2,757
		5,531	1,718	4,374	1,701
		3,297	2,016	6,136	2,073
2º Parâmetro	0,03	1,149	2,474	3,259	3,334
		1,397	2,273	3,519	2,623
		1,242	2,895	2,895	2,619
3º Parâmetro	0,04	1,128	3,721	1,769	4,674
		1,606	4,838	1,932	4,174
		1,687	4,266	1,629	4,365

APENDICE C – DESENHO DO CORPO DE PROVA



APENDICE D – IMAGENS DO DESGASTE DA ARESTA DE CORTE PERIFÉRICA DA FRESA

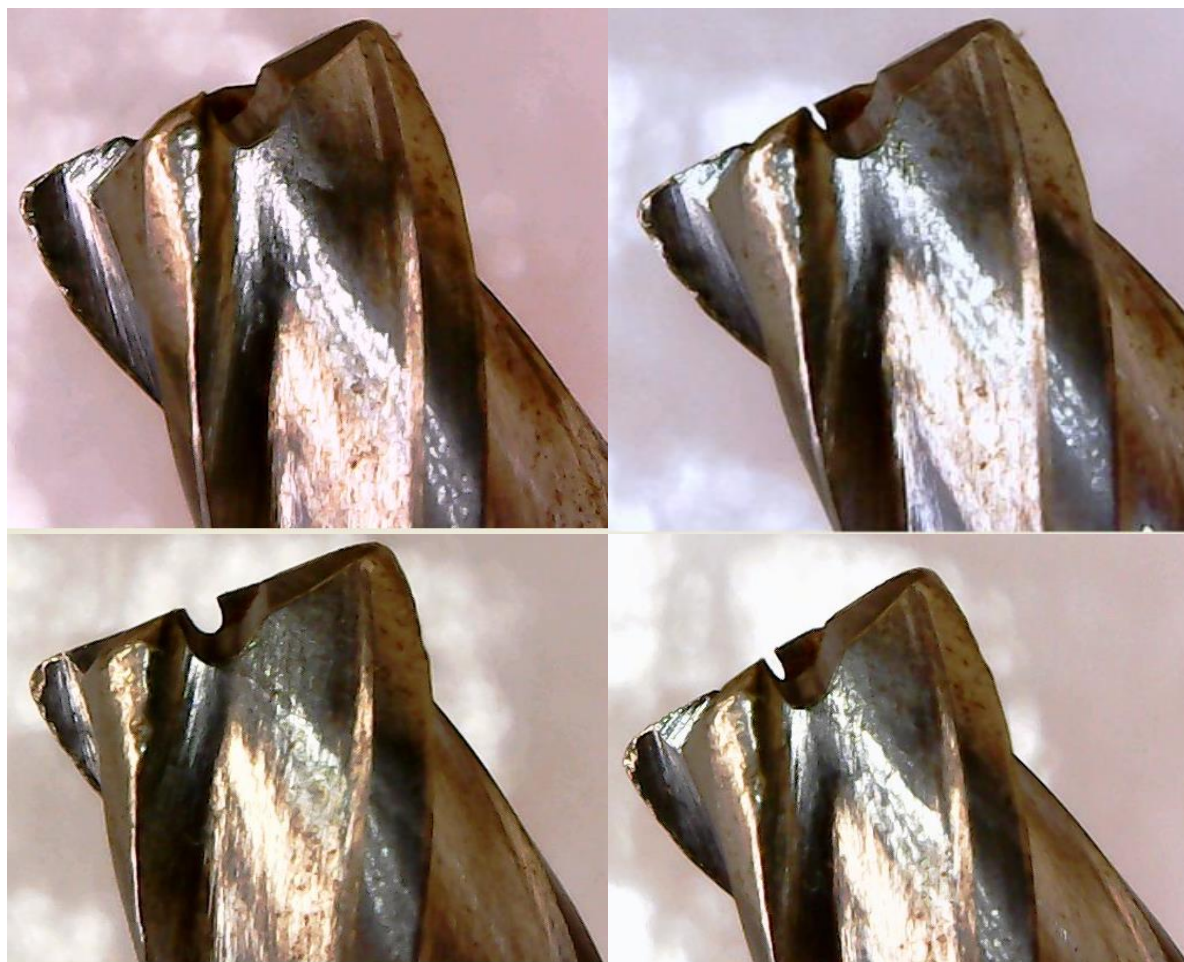
As imagens do desgaste da aresta de corte periférica da fresa foi realizado com microscópio eletrônico.

1º PARÂMETRO SENTIDO CONCORDANTE

$V_c - 15 \text{ m / min}$

$F_z = 0,03$

Desgaste severo - 3120 mm de usinagem.

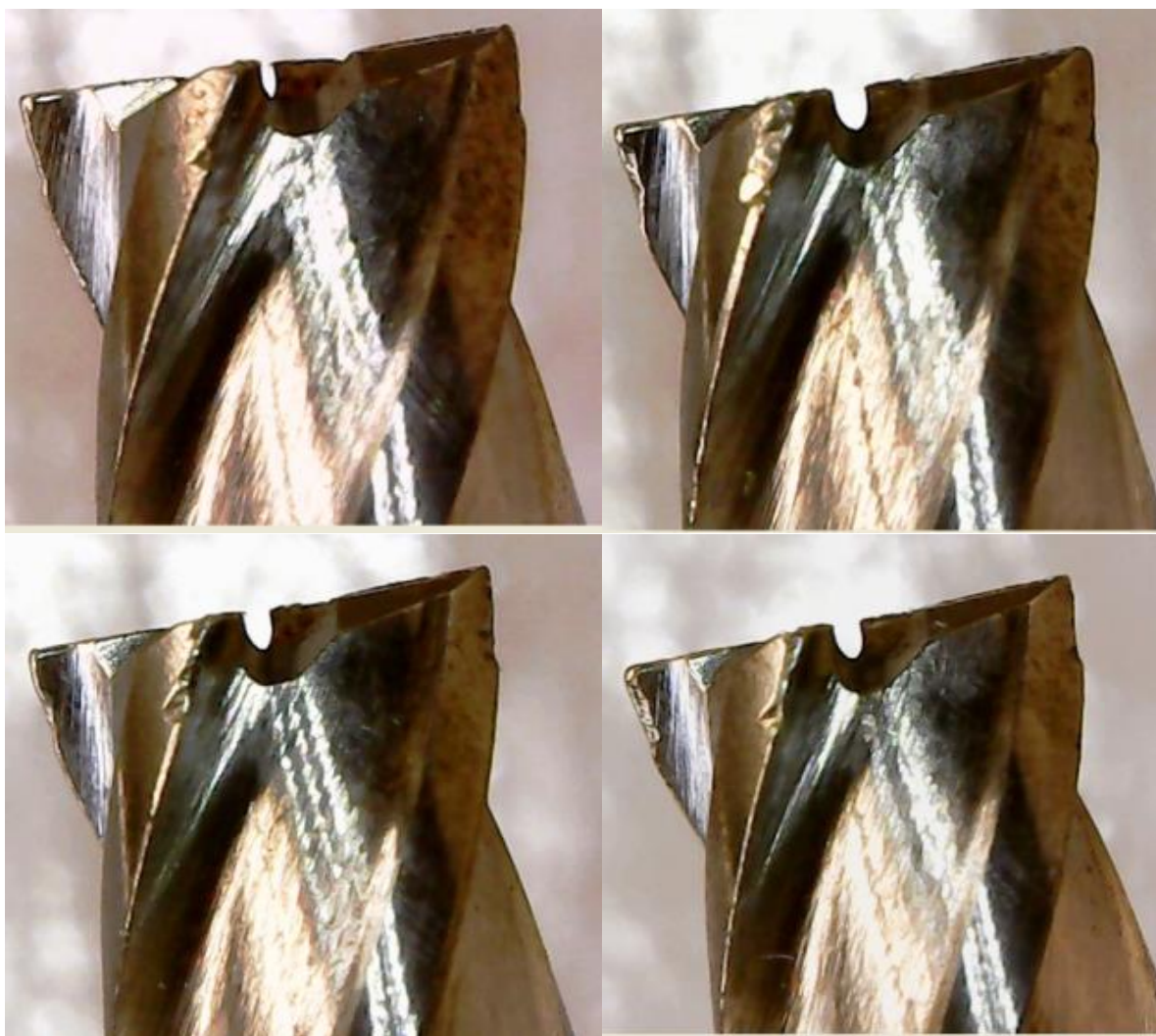


1º PARÂMETRO SENTIDO DISCORDANTE

$V_c - 15 \text{ m / min}$

$F_z = 0,03$

Desgaste normal - 5920m m de usinagem.



2º PARÂMETRO SENTIDO CONCORDANTE

$V_c = 15 \text{ m / min}$

$F_z = 0,018 \text{ mm/aresta.}$

Desgaste severo -1,6 mm de usinagem.

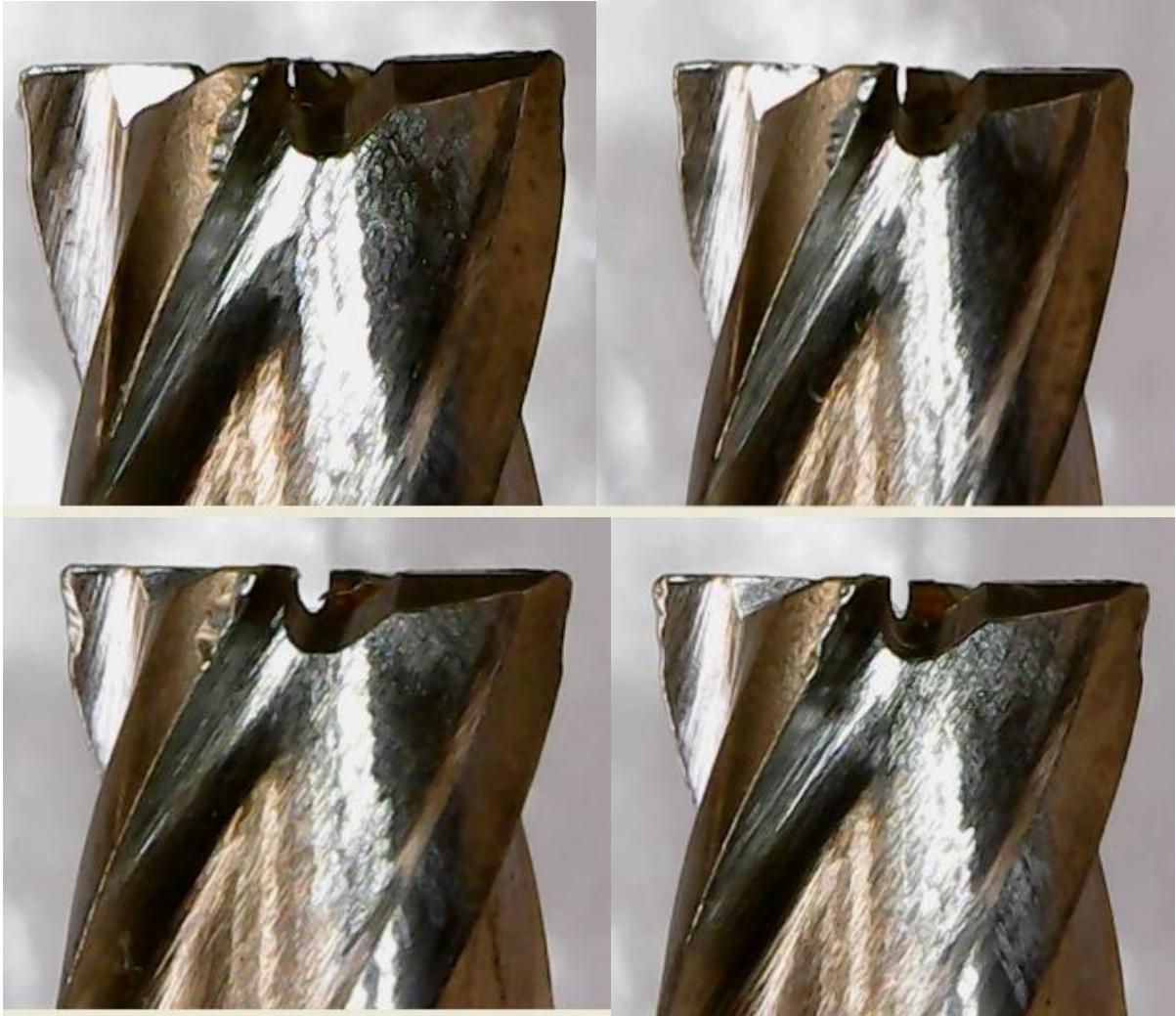


2º PARÂMETRO SENTIDO DISCORDANTE

V_c - 15m / min

F_z = 0,018 mm/aresta.

Desgaste normal - 4560 mm de usinagem.

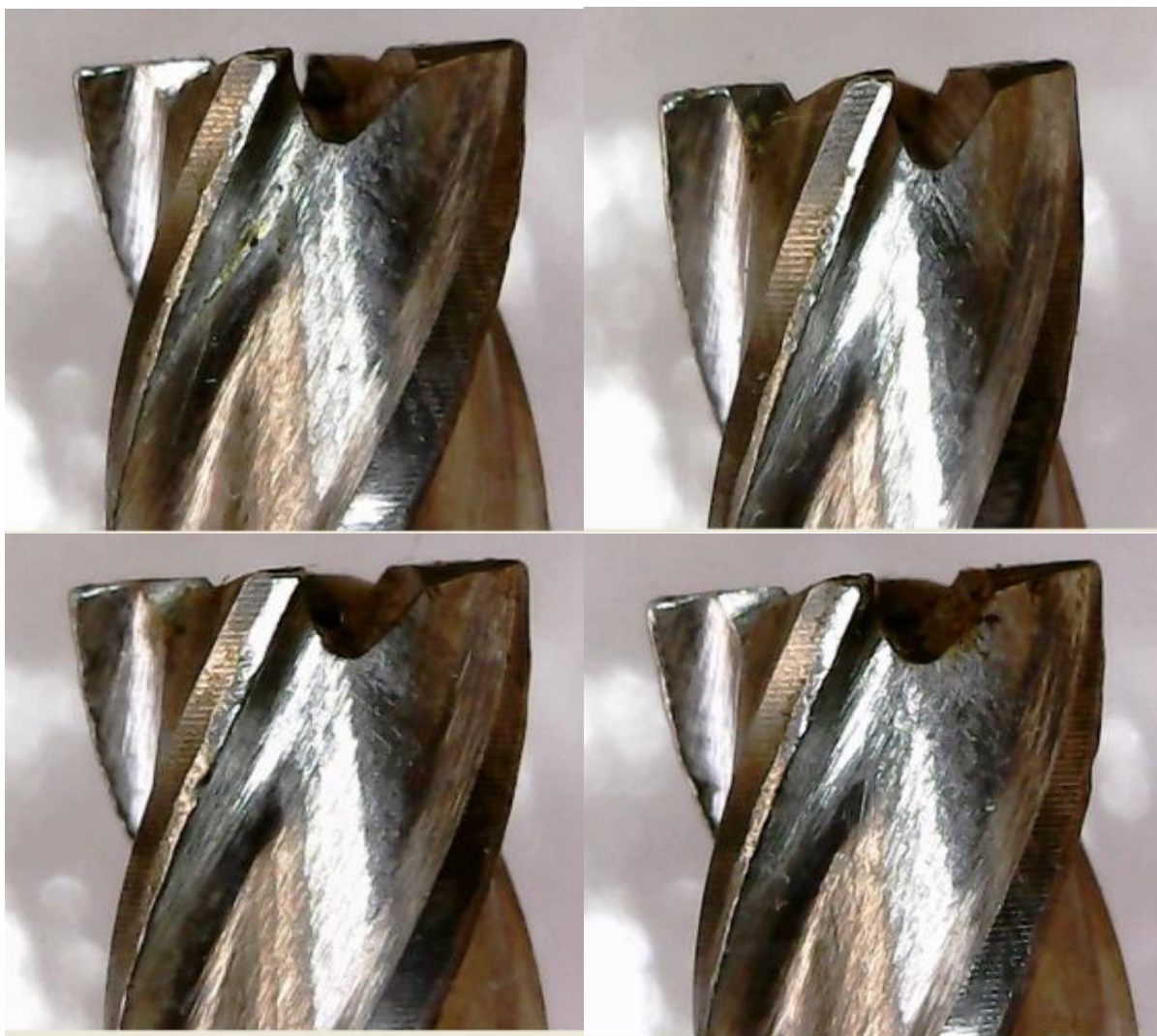


3° PARÂMETRO SENTIDO CONCORDANTE

$V_c - 15 \text{ m / min}$

$F_z = 0,04 \text{ mm/aresta.}$

Desgaste normal – 3120m m de usinagem.



3° PARÂMETRO SENTIDO DISCORDANTE

$V_c - 15 \text{ m / min}$

$F_z = 0,04 \text{ mm/aresta.}$

Desgaste norma l- 4560 mm de usinagem.

