

MARCELO CAPELLO ROLIM DE SOUZA

**Características do fresamento assimétrico do aço AISI 4340 endurecido com
ferramentas de metal duro recobertas com TiAlN e TiN**

Marcelo Capello Rolim de Souza

**Características do fresamento assimétrico do aço AISI 4340 endurecido com
ferramentas de metal duro recobertas com TiAlN e TiN**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves

S729c Souza, Marcelo Capello Rolim de
Características do fresamento assimétrico do aço AISI 4340
endurecido com ferramentas de metal duro recobertas com TiAlN e TiN
/ Marcelo Capello Rolim de Souza – Guaratinguetá, 2018.
93 f : il.
Bibliografia: f. 91-93

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.
Orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves

1. Usinagem. 2. Aço. 3. Aspereza de superfície. I. Título.

CDU 621.9

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

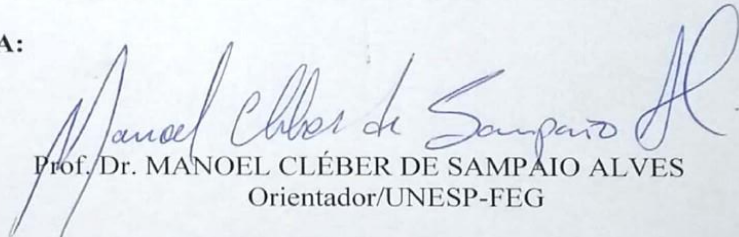
MARCELO CAPELLO ROLIM DE SOUZA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


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

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


Prof. Msc. SARAÍ DAVID MÜZEL
UNESP-FEG

Dezembro de 2018

DADOS CURRICULARES

MARCELO CAPELLO ROLIM DE SOUZA

NASCIMENTO	17.09.1994 – Atibaia / SP
FILIAÇÃO	Marcelo José Rolim de Souza Adriana Capello de Souza
2013/2018	Bacharelado em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - FEG/UNESP
2010/2011	Técnico em Automação Industrial Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - IFSP

Dedico este trabalho aos meus pais Marcelo e Adriana e a minha avó Maria Inêz, que sempre me apoiaram em todas as minhas decisões. Gostaria de dedicar este trabalho especialmente ao meu avô Job Peranovick Capello, que infelizmente nos deixou, para se tornar a mais brilhante estrela no céu, no dia da defesa deste trabalho de graduação, e que assim como meus outros avós Mário e Marcolina, que são as eternas estrelas da minha vida, e continuam torcendo por mim em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu professor orientador Manoel Cléber de Sampaio Alves, pela oportunidade de continuar meus estudos em usinagem dos materiais e principalmente pela oportunidade de realizar iniciações científicas, sobre este tema, durante minha formação.

Agradeço ao professor José Vitor Cândido de Souza e a professora Sarah David Müzel por constituírem a minha banca avaliadora e por compartilharem comigo o momento mais gratificante da minha vida, a minha primeira formação.

Agradeço intensamente ao meu pai Marcelo José Rolim de Souza e a minha mãe Adriana Capello de Souza, que mesmo com todas as dificuldades, estavam presentes no dia desta defesa e puderam compartilhar comigo este turbilhão de emoções.

Eu agradeço aos meus avós Mário de Souza Freitas e Marcolina da Conceição Rolim de Souza pelos diversos ensinamentos no decorrer da minha vida e que mesmo de longe, no céu, sei o quanto vocês gostariam de poder sentir este momento. Gostaria de agradecer especialmente ao meu avô Job Peranovick Capello, que no dia da defesa deste trabalho, partiu, para viver junto aos anjos e seus ídolos.

Agradeço a minha avó Maria Inêz de Souza Capello por todas as risadas e momentos que fazemos questão de compartilhar até hoje nos momentos que volto para casa, fazendo minha infância voltar à tona e relembrar momentos que cada vez são mais gratificantes.

Eu agradeço meus tios Laerte e Maria Célia pela oportunidade de fazer cursinho em São Paulo, saibam que sem este momento, eu não conseguiria ter construído nada do que consegui realizar até hoje.

Agradeço a Universidade Estadual Paulista por ter me acolhido de uma maneira incrível e por ter me construído o profissional que sou hoje. Agradeço a todos os funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá, principalmente do Departamento de Materiais e Tecnologia, especialmente técnico Mané, que conduziu todos os experimentos que realizei para a construção deste trabalho.

Agradeço especialmente a Gabriela, Clidenora e a Larissa, que estavam presentes no dia da defesa e puderam me ver neste último momento dentro da faculdade.

Finalizo esses agradecimentos, dedicando este trabalho a todos os amigos e irmãos da República Papagatas, que como uma grande família me guiaram desde meu primeiro dia da faculdade.

“O período de maior ganho em conhecimento e experiência é o período mais difícil na vida de alguém.”

Dalai Lama

RESUMO

Novos métodos vem sendo estudados para otimizar os processos de usinagem, visando a redução de custos e seu consequente aumento de produtividade, ocasionando a diminuição dos possíveis impactos ambientais, que eram relacionados a estes processos. Dentre os diversos métodos em destaque, hoje, os que possuem maior importância, são àqueles relacionados a usinagem a seco juntamente com a usinagem de aços endurecidos, o que ocasionou uma evolução nas ferramentas utilizadas, que cada vez possuem recobrimentos mais sofisticados. Estas melhorias visam eliminar as etapas de retificação que encarecem todo o processo. Com base no exposto, este trabalho tem como objetivo principal avaliar o fresamento assimétrico em diferentes condições analisando as variáveis de saída: qualidade superficial, potência consumida, vibração, emissão acústica, desgaste da ferramenta e cavaco. Este trabalho analisou o processo de usinagem do aço AISI 4340 endurecido, através do fresamento frontal assimétrico em duas diferentes condições, sendo que em uma delas a condição de largura de usinagem utilizada foi menor que a metade do diâmetro da fresa e na outra, a condição de largura de usinagem foi maior que metade do diâmetro da fresa. Analisou-se ainda a influência da velocidade de corte e do avanço. Foram utilizadas ferramentas de metal duro com recobrimento de TiAlN e TiN e não foi utilizada nenhum tipo de lubri-refrigeração. Foi adotado um planejamento de experimentos do tipo fatorial completo com duas larguras de corte, sendo 1/3 e 2/3 do diâmetro da fresa, 3 velocidades de corte (150, 200 e 250 m/min) e dois avanços (0,1 e 0,2 mm/rot). Para tratar os resultados, foram utilizadas análises de variância (ANOVA), teste de Tukey, análise de regressão e análise de desejabilidade. Para a primeira condição de assimetria, na qual a largura de usinagem é menor do que metade do diâmetro, observou-se que o maior valor de rugosidade média R_a , foi obtido para a velocidade de corte $V_c = 200$ m/min, a potência não apresentou variações significativas e notou-se o aumento da emissão sonora com o aumento da velocidade de corte (V_c) ou da velocidade de avanço (V_f). Na segunda condição analisada, o maior valor de R_a ocorreu para as maiores velocidades: $V_c = 250$ m/min e $V_f = 0,2$ mm/rot. A vibração neste segundo ensaio permaneceu constante e a emissão sonora cresceu com o aumento das velocidades.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem a seco. Rugosidade. Potência. Vibração. Qualidade superficial.

ABSTRACT

New methods have been studied to optimize machining processes, aiming at reducing costs and consequently increasing productivity, leading to a decrease in the possible environmental impacts that were related to these processes. Among the several methods currently under consideration, the most important ones today are those related to dry machining along with the machining of hardened steels, which has resulted in an evolution in the tools used, which each time have more sophisticated coatings. These improvements aim to eliminate the rectification steps that make the whole process more expensive. Based on the above, this work has as main objective to evaluate the asymmetric milling in different conditions analyzing the output variables: surface quality, power consumed, vibration, acoustic emission, tool wear and chip. This work analyzed the machining process of hardened AISI 4340 steel through asymmetric front milling in two different conditions, in one of which the machining width condition was less than half the diameter of the milling cutter and in the other condition of machining width was greater than half the milling cutter diameter. The influence of cutting speed and feed rate was also analyzed. Hard metal tools with TiAlN and TiN coating were used and no type of lubrication was used. A complete factorial type experiment design with two cutting widths was adopted, being 1/3 and 2/3 of the cutter diameter, 3 cutting speeds (150, 200 and 250 m/min) and two advances (0.1 and 0.2 mm/rot). To analyze the results, analysis of variance (ANOVA), Tukey's test, regression analysis and desirability analysis were used. For the first condition of asymmetry, in which the machining width is less than half the diameter, it was observed that the highest average roughness value R_a was obtained for the cutting speed $V_c = 200$ m/min, showed significant variations and it was noticed the increase of the sound emission with the increase of the cutting speed (V_c) or the speed of advance (V_f). In the second analyzed condition, the highest value of R_a occurred for the highest velocities: $V_c = 250$ m/min and $V_f = 0.2$ mm/rev. The vibration in this second test remained constant and the sound emission increased with increasing velocities.

KEYWORDS: Dry machining. Roughness. Power. Vibration. Surface quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de fresamento assimétrico.....	23
Figura 2 - Parâmetros “ a_f ”, “ a_e ” e “ a_p ”, para o fresamento: a) tangencial e b) frontal	24
Figura 3 - Ilustração do movimento de avanço, corte e efetivo para um fresamento discordante	25
Figura 4 - Mecanismos de formação de cavaco	27
Figura 5 - Classificação das formas dos cavacos para a norma ISO 3685:1993	28
Figura 6 - Correlação entre avanço e profundidade de corte para cada tipo de cavaco	29
Figura 7 - Desgastes e avarias comuns.....	34
Figura 8 - Rugosidade média (R_a)	36
Figura 9 - Rugosidade Total (R_t).....	39
Figura 10 - Esquema do corpo de prova utilizado.....	43
Figura 11 - Curva de revenimento, para têmpera a partir de 850°C.....	44
Figura 12 - Centro de usinagem DMG Ecoline.....	45
Figura 13 - Ferramenta utilizada – Vista frontal, Lateral 1 e Lateral 2.....	48
Figura 14 - Esquema da ferramenta utilizada – Lateral 1 e Lateral 2	48
Figura 15 - Fresa utilizada – Suporte (a) e Pinça (b).....	48
Figura 16 - Sensor de transdução de corrente da marca LEM modelo AT 5 B10	49
Figura 17 - Sistema de captação da emissão acústica da marca Physical Acoustics Corporation	51
Figura 18 - Sensor de vibração modelo TV-100	51
Figura 19 - Microscópio de medição Mahr	52
Figura 20 - Rugosímetro marca Mahr modelo Marsurf M300	53
Figura 21 - Medição da rugosidade sendo realizada	53
Figura 22 - Gráfico de interação entre a velocidade e a rugosidade – condição de assimetria 1	56
Figura 23 - Média da rugosidade com seu respectivo desvio padrão – condição de assimetria 1	57
Figura 24 - Gráfico de interação entre a velocidade e a rugosidade – condição de assimetria 2	58
Figura 25 - Média da rugosidade com seu respectivo desvio padrão – condição de assimetria 2	59
Figura 26 - Principais efeitos entre as variáveis de entrada para a rugosidade média R_a	59

Figura 27 - Método de Tukey para avaliação da variação da influência de V_c	60
Figura 28 - Gráfico de interação entre as variáveis de entrada e a saída R_a	61
Figura 29 - Rugosidade total em função da velocidade de corte – condição de assimetria 1 ..	62
Figura 30 - Rugosidade total em função da velocidade de corte – condição de assimetria 1 ..	63
Figura 31 - Rugosidade total em função da velocidade de corte – condição de assimetria 2 ..	63
Figura 32 - Rugosidade total em função da velocidade de corte – condição de assimetria 2 ..	64
Figura 33 - Principais efeitos entre as variáveis de entrada para a rugosidade total R_t	65
Figura 34 - Método de Tukey para avaliação da variação da influência de V_c	65
Figura 35 - Gráfico de interação entre as variáveis de entrada e a saída R_t	66
Figura 36 - Principais efeitos entre as variáveis de entrada para a potência	67
Figura 37 - Método de Tukey para avaliação da influência de V_c	68
Figura 38 - Gráfico de interação entre as variáveis de entrada e a saída potência - P (W)	69
Figura 39 - Principais efeitos entre as variáveis de entrada para a vibração	70
Figura 40 - Método de Tukey para avaliação da influência de V_c	71
Figura 41 - Gráfico de interação entre as variáveis de entrada e a saída potência - P (W)	72
Figura 42 - Principais efeitos entre as variáveis de entrada para a emissão acústica	73
Figura 43 - Gráfico de interação entre as variáveis de entrada e a saída emissão acústica (V).....	74
Figura 44 - Principais efeitos entre as variáveis de entrada para a vibração	75
Figura 45 - Método de Tukey para avaliação da influência de V_c	76
Figura 46 - Gráfico de interação entre as variáveis de entrada e a saída emissão sonora (dB).....	77
Figura 47 - Desgaste das ferramentas utilizadas para o fresamento frontal - Ensaio 1, com as seguintes condições ($V_c = 150$ m/min; $V_f = 0,1$ mm/volta; $a_p = 8,4$ mm).....	80
Figura 48 - Desgaste das ferramentas utilizadas para o fresamento frontal - Ensaio 2, com as seguintes condições ($V_c = 150$ m/min; $V_f = 0,2$ mm/volta; $a_p = 8,4$ mm).....	80
Figura 49 - Desgaste das ferramentas utilizadas para o fresamento frontal - Ensaio 9, com as seguintes condições ($V_c = 200$ m/min; $V_f = 0,1$ mm/volta; $a_p = 16,7$ mm).....	81
Figura 50 - Desgaste das ferramentas utilizadas para o fresamento frontal - Ensaio 12, com as seguintes condições ($V_c = 250$ m/min; $V_f = 0,2$ mm/volta; $a_p = 16,7$ mm).....	81
Figura 51 - Formação do cavaco para as diferentes condições de usinagem, para $a_p = 8,4$ mm	82
Figura 52 - Formação do cavaco para as diferentes condições de usinagem, para $a_p = 16,7$ mm	83
Figura 53 - Tabela de correlação para R_a - Minitab	91
Figura 54 - Tabela de correlação para R_t - Minitab	921

Figura 55 - Tabela de correlação para Potência – Minitab.....	93
Figura 56 - Tabela de correlação para Emissão Acústica - Minitab.....	932
Figura 57 - Tabela de correlação para Vibração – Minitab.....	94
Figura 58 - Tabela de correlação para Emissão Sonora - Minitab	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço ABNT 4340.....	20
Tabela 3 - Composição química do aço SAE 4340 utilizado	43
Tabela 4 - Condições de V_c para as duas condições de simetria analisadas.....	46
Tabela 5 - Condições de V_f para as duas condições de simetria analisadas	46
Tabela 6 - Fatorial completo de todos os ensaios realizados.....	46
Tabela 7 - Desgaste medido por ferramenta utilizada	78
Tabela 8 - Desgaste medido em relação ao comprimento de corte usinado.....	78
Tabela 9 - Tabela de relação de avarias por pastilha em cada ensaio	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Rugosidade média (R_a), esperada para cada processo de usinagem	37
Quadro 2 - Rugosidade média (R_a) em função da aplicação	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVO	19
2.1	OBJETIVOS GERAIS.....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	INTRODUÇÃO.....	19
3.2	AÇOS.....	19
3.2.1	Aço AISI 4340	20
3.3	PROCESSO DE USINAGEM.....	20
3.3.1	Usinagem de aços endurecidos	21
3.3.2	Fresamento	22
3.3.2.1	Fresamento Frontal.....	22
3.3.2.2	Fresamento Simétrico e Assimétrico.....	23
3.3.2.3	Parâmetros de corte para o fresamento.....	23
3.3.3	Mecanismos de formação de cavaco	25
3.3.3.1	Tipos e formas de cavaco.....	27
3.4	FERRAMENTA DE CORTE.....	29
3.4.1	Materiais para ferramenta	30
3.4.1.1	Metal Duro.....	31
3.4.1.2	Cobertura por TiAlN e TiN.....	31
3.4.2	Desgastes e avarias	32
3.5	RUGOSIDADE.....	34
3.5.1	Rugosidade média (Ra)	36
3.5.2	Rugosidade total (Rt)	38
3.6	POTÊNCIA DE USINAGEM.....	39
3.7	EMISSÃO ACÚSTICA.....	40
3.8	EMISSÃO SONORA.....	41
3.9	VIBRAÇÃO.....	41
4	MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1	CORPOS DE PROVA UTILIZADOS.....	43
4.2	PROCESSO DE USINAGEM.....	44
4.3	FRESAMENTO.....	45

4.3.1	Ferramentas e suporte	47
4.3.2	Aquisição de dados.....	49
4.3.3	Potência de corte	49
4.3.4	Emissão acústica.....	50
4.3.5	Vibração.....	51
4.3.6	Emissão Sonora	52
4.3.7	Desgaste da ferramenta	52
4.3.8	Rugosidade superficial.....	52
4.3.9	Estudo dos cavacos.....	53
4.4	TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	550
5.1	AÇO SAE 4340 TEMPERADO E REVENIDO	55
5.2	RUGOSIDADE MÉDIA (R_A)	55
5.2.1	Análise estatística	55
5.3	RUGOSIDADE TOTAL (R_T).....	61
5.3.1	Análise estatística	61
5.4	POTÊNCIA CONSUMIDA.....	67
5.4.1	Análise de Variância	67
5.5	VIBRAÇÃO.....	69
5.6	EMISSÃO ACÚSTICA	72
5.7	EMISSÃO SONORA.....	74
5.8	DESGASTE DA FERRAMENTA	77
5.8.1	Desgaste da Ferramenta em função do comprimento usado.....	77
5.8.2	Análise Qualitativa.....	79
5.9	TIPOS E FORMAS DOS CAVACOS	81
5.10	COMENTÁRIOS GERAIS	84
6	CONCLUSÃO	87
	REFERÊNCIAS.....	88
	APÊNDICE.....	91

1 INTRODUÇÃO

O processo de usinagem é descrito como sendo um processo de fabricação mecânica no qual uma determinada peça tem seu formato modificado pela retirada de material base na forma de cavaco através da ação de uma determinada ferramenta de corte. Os processos de usinagem são utilizados na indústria metal mecânica, quando são necessárias elevada precisão geométrica e dimensional além da alta qualidade superficial.

Dentre os processos mais conhecidos na usinagem podemos mencionar: o torneamento e o fresamento; no primeiro as peças fabricadas possuem geometria cilíndrica ou cônica, sendo mais utilizado para a fabricação e polias, eixos, cubos, dentre outros através da retirada de cavaco por uma ferramenta monocortante. Já com relação ao segundo processo de fabricação, a geometria das peças obtidas é diversa, por exemplo: blocos de motores, moldes e matrizes, dentre outros; e a ferramenta utilizada para a retirada do material é multicortante.

O aço AISI 4340 é largamente utilizado nos setores automobilístico e aeronáutico, em peças que estão sob elevados esforços dinâmicos como virabrequins e trens de pouso, porém este tipo de material apresenta boa resistência à fadiga, elevada temperabilidade, além de boa forjabilidade e tenacidade. Estas propriedades são obtidas através dos elementos de liga que compõem este aço (CHIAVERINI, 1986).

O estudo da usinagem em aços de elevada dureza tem como justificativa a não execução da etapa de retificação, tão comum em processos deste tipo, para assegurar as qualidades dimensionais e superficiais do produto final, possibilitando a redução de tempo e de custos do processo produtivo. Para que seja alcançado este objetivo é necessário que tanto a máquina que será utilizada no processo, quanto a ferramenta utilizada para desbastar o metal, possuam grande qualidade e resistência.

Por estarem sujeitas a grandes esforços e principalmente a elevadas temperaturas durante o processo de usinagem, as ferramentas são constantemente aprimoradas, e a busca por novos materiais se torna constante. Dentre os diferentes materiais e técnicas utilizadas para melhorar a qualidade das pastilhas, destaca-se o uso de recobrimentos como por exemplo: TiN (nitreto de titânio) e com TiAlN (nitreto de alumínio titânio), o primeiro é responsável por reduzir o atrito durante o contato entre as partes e o segundo auxilia no controle da temperatura da ferramenta, devido a sua baixa condutividade térmica.

Como nos processos de usinagem a temperatura é um fator de destaque, é comum utilizar artifícios como fluidos de corte para exercer as funções de lubrificação, ou seja:

facilitar o processo de corte; e a refrigeração, ou seja: reduzir a temperatura de contato entre a ferramenta e a peça.

Em virtude de diversos malefícios causados pela utilização e descarte dos fluídos de corte, percebe-se uma tendência a estruturar processos por meio de técnicas alternativas, que visam diminuir os impactos ambientais gerados pela utilização destes fluídos e a consequente redução dos gastos, que segundo Sreejith e Ngoi (2000) podem representar até 20% dos custos finais de produção.

Para isso, inúmeras pesquisas vem sendo desenvolvidas para estudar o desempenho de técnicas como o MQL (mínima quantidade de fluído) e a usinagem à seco, porém para que estas técnicas sejam valiosas é obrigatório que elas não afetem a forma final da peça, bem como afete significativamente as variáveis de saída do processo, como: rugosidade da peça, potência consumida, vida da ferramenta, etc.

Baseado no exposto, este trabalho visa analisar a usinabilidade do aço AISI 4340 endurecido, sem utilizar fluído de corte – usinagem a seco, levando em consideração a característica do fresamento, seja ele simétrico ou assimétrico – com o centro da fresa dentro ou fora da peça a ser usinada, utilizando-se para isso de ferramentas recobertas com TiAlN e TiN, com o propósito de encontrar as melhores condições de usinagem para este aço. Além disso, serão analisados a influência do desgaste da ferramenta na qualidade superficial, a potência consumida, a emissão acústica e as vibrações obtidas para este processo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

Este estudo, tem como objetivos gerais a caracterização da usinagem por fresamento frontal em diferentes características simétricas e assimétricas para o aço AISI 4340 temperado, utilizando ferramentas de metal duro recobertas por TiAlN e TiN, sem a utilização de fluido de corte.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para diferentes condições pré-determinadas, buscou-se:

Avaliar, utilizando as variáveis de saída do processo, as variações entre o fresamento do tipo assimétrico – com o centro da fresa fora da peça e assimétrico com o centro da fresa dentro da peça, utilizando-se para isso de ferramentas de metal duro revestidas com TiAlN e TiN, em condições de usinagem à seco, ou seja, sem utilização de fluídos de corte;

Analisar os efeitos do posicionamento da ferramenta durante a usinagem por fresamento frontal;

Estudar o comportamento da potência consumida, desgaste da ferramenta e vibração para cada posição da ferramenta e em cada uma das condições analisadas;

Analisar os resultados de qualidade superficial por meio do estudo da rugosidade média (R_a) e da rugosidade total (R_t);

Estudar as principais consequências dos dois tipos de fresamento assimétrico com o centro da fresa dentro ou fora da peça, em um material de elevada dureza, não utilizando refrigeração;

Verificar a eficiência do processo realizado, analisando para isso o desgaste e avarias nas ferramentas utilizadas e as melhores condições de acabamento obtidas;

Analisar os cavacos produzidos em cada uma das condições estudadas, levando em conta sua geometria e sua respectiva coloração.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 INTRODUÇÃO

O termo usinagem, pode ser utilizado para descrever um processo de modificação da geometria de uma determinada peça. Segundo Ferraresi et al, 1977, a usinagem pode ser descrita como um processo simples e ao mesmo tempo complexo, pois nele são produzidas peças por meio da remoção do excesso de material, na forma de cavaco.

As duas principais etapas da usinagem são o desbaste e o acabamento, na primeira o material é retirado de uma forma mais intensa, e tem-se como objetivo a aproximação da geometria final da peça; já a segunda etapa tem como característica principal conferir a peça um melhor acabamento superficial, melhorando a qualidade final da peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Tendo em vista o claro objetivo das indústrias em se produzir mais produtos, com uma qualidade superior, e ao mesmo tempo reduzir os custos de fabricação, as indústrias de usinagem possuem um grande desafio: conciliar a alta qualidade das peças produzidas, através do bom acabamento superficial e de preferência com uma alta taxa de remoção de material (MANDAL; DOLOI; MONDAL; DAS, 2011). Este desafio se torna mais complexo conforme ocorre o aumento da dureza do material usinado, como é o caso do aço AISI 4340.

3.2 AÇOS

Os aços são ligas constituídas por ferro-carbono, sendo que diferentes concentrações destes dois elementos, combinados com os mais diversos elementos químicos e tratamentos térmicos, podem dar origem a uma infinidade de diferentes ligas com suas próprias características e aplicações (CALLISTER Jr; RETHWISCH, 2013).

O aço comum ou aço carbono, é constituído principalmente de ferro e carbono, porém possui traços residuais de outros elementos como: manganês, enxofre, silício e fósforo. Já o aço liga ou aço especial, além de possuir o ferro e o carbono como elementos principais, possuem outros elementos químicos em concentrações específicas, para conferir a liga final uma determinada característica (ROMEIRO, 1997; CALLISTER Jr; RETHWISCH, 2013). Dentre os principais objetivos de se criar um aço liga, encontram-se: alterar suas propriedades de resistência mecânica, proporcionar uma melhor resistência a oxidação e desgaste, e elevar sua usinabilidade e temperabilidade.

3.2.1 Aço AISI 4340

O aço AISI 4340 é classificado como um aço super-resistente e foi vastamente utilizado na fabricação de mísseis e aviões na sua concepção. Este tipo de aço possui médio teor de carbono porém sua característica marcante como a temperabilidade é conferida por conta da grande presença de elementos de liga (CHIAVERINI, 1986).

Este aço é largamente utilizado em peças que necessitam de uma boa relação entre tenacidade e resistência mecânica, tendo vasta utilização, principalmente em componentes como: engrenagens, eixos, acoplamentos, trens de pouso, dentre outros nas indústrias aeronáutica e automobilística (SILVA et al., 2005; EL RAYES; EL-DANAF; ALMAJID, 2015; SAHU; CHOUDHURY, 2015; SHARMA; PANDEY, 2016).

A baixa soldabilidade e usinabilidade são duas características muito marcantes deste aço-liga, porém ele pode ser termicamente tratável, o que pode alterar sua resistência mecânica, além de ser resistente à fadiga em elevadas temperaturas fazendo com que possa ser utilizado em estruturas críticas (BHATTACHARYA et al., 2011).

O aço AISI 4340 possui as seguintes composições, descritas na Tabela 1, de acordo com a ABNT NBR NM 87:1996.

Tabela 1: Composição química do aço ABNT 4340

ABNT/SAE	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
4340	0,38 – 0,43	0,60 – 0,80	0,15 – 0,35	1,65 – 2,00	0,70 – 0,90	0,20 – 0,30

Fonte: Adaptado de ABNT NBR NM 87 (1996).

3.3 PROCESSO DE USINAGEM

Segundo a DIN 8580, o processo de usinagem consiste em todo processo de fabricação em que ocorre a remoção do material base em forma de cavaco. O processo de usinagem, então, é aquele que visa alterar a dimensão, forma geométrica ou acabamento superficial de um determinado componente, através da remoção de material – cavaco.

Os processos de fabricação podem ser divididos em processos com e sem remoção de cavaco, nos processos sem remoção encontramos a fundição, soldagem, metalurgia do pó, conformação dentre outros. Já nos processos com remoção de cavaco é possível citar a usinagem onde encontramos processos como: Torneamento, fresamento e furação.

Já que a usinagem é a forma mais popular do mundo de processo de fabricação (LAURO et al., 2014), é necessário ter clareza de todas as variáveis que afetam a saída do processo.

Segundo Machado et al., 2009, devido as inúmeras variáveis de um processo de usinagem, ele se torna imprevisível e complexo; já que para alcançar bons resultados é necessário encontrar os melhores parâmetros, para obter um processo satisfatório. Uma das formas de obter um maior controle sob estas variáveis, e minimizar possíveis erros é aplicar a técnica de monitoramento contínuo para todos os parâmetros que podem influenciar no resultado final da peça usinada (LAURO et al., 2014). Utilizando-se desta tecnologia é possível determinar os esforços envolvidos através da análise da potência e da vibração, do desgaste da ferramenta através de análises microscópicas da mesma, por exemplo.

3.3.1 Usinagem de aços endurecidos

A usinagem de aços endurecidos, quando realizada com qualidade, aumenta a vida à fadiga dos componentes produzidos e causa pequenas alterações em sua microestrutura que está relacionada à dureza (IGBAL et al, 2008).

Um aço para que seja considerado duro deve possuir dureza superior a 45 HRC. Dentre as formas de medição de dureza superficial, se destaca a dureza Rockwell, que possui vasta utilização nas indústrias, principalmente nas metalúrgicas.

Nestas condições o aço apresenta uma microestrutura com maior porcentagem de martensita, o que auxilia na elevação da dureza. Como os aços endurecidos possuem grande resistência ao desgaste, então eles são utilizados em componentes que exigem tal esforço, como pista de rolamentos, estampas, punções e ferramentas de trabalho a frio, como brocas e machos.

O principal objetivo com o estudo da usinagem de aços endurecidos, consiste na eliminação da etapa de retificação que acaba por encarecer o processo, em busca de uma melhor qualidade superficial.

O maior interesse em estudar a usinagem de aços de elevada dureza consiste em eliminar a etapa de retificação, para alguns casos. Com isso é possível reduzir custos de produção, reduzir o tempo de usinagem além de gerar peças com excelente acabamento superficial e pequenas tolerâncias, o que mostra a grande exatidão deste tipo de usinagem quando aliada a um conjunto máquina-ferramenta de grande rigidez (LIMA; CORRÊA, 2002).

3.3.2 Fresamento

A usinagem por fresamento é utilizada para a confecção de peças com geometrias diversas, podendo muitas vezes ser um procedimento complexo. A ferramenta utilizada no processo de fresamento é conhecida por fresa. Esta ferramenta rotativa é multicortante e possui arestas de corte dispostas de forma simétrica em relação ao eixo da ferramenta. Durante o processo de usinagem, a fresa gira e se desloca em relação ao material a ser usinado na direção escolhida, conferindo ao material a dimensão, forma e acabamento desejado a peça final (DINIZ et al., 2013).

Devido ao processo poder gerar diversas combinações de corte, ele pode conferir a peça final uma infinidade de geometrias e acabamentos, o que faz com que o fresamento seja um processo muito versátil (DINIZ et al., 2001; KALPAKJIAN e SCHMID, 2010).

Segundo Ferraresi et al., 2013, o fresamento pode ser subdividido em 3 tipos principais: frontal, cilíndrico e tangencial. Porém outras classificações podem ser feitas, como: o movimento relativo entre a peça e a ferramenta levando em consideração o sentido de corte e avanço chamando de discordante quando estão em movimento de sentido concorrente e concordante quando estão em movimento de mesmo sentido. Ao levar em consideração a posição do eixo árvore da máquina, pode dividir o processo em horizontal, vertical e inclinado (DINIZ et al., 2013; STEMMER, 2005). Outra forma para se caracterizar o fresamento consiste em analisar a posição da fresa com relação a peça, e os esforços a que a fresa está submetida, podendo o processo ser dividido em dois tipos principais: o fresamento simétrico e o fresamento assimétrico.

3.3.2.1 Fresamento Frontal

Segundo Diniz, et al., 2013, a principal característica deste tipo de fresamento é que os dentes ativos da fresa estão situados na superfície frontal da ferramenta e a superfície plana obtida é perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta.

Dado o posicionamento perpendicular à superfície usinada, este tipo de fresamento possui algumas vantagens quando comparado ao fresamento tangencial (METALS HANDBOOK, 2004):

- Maior rigidez do sistema máquina ferramenta, já que não existe a possibilidade de flexão do eixo de rotação da ferramenta;
- Possibilita usinar grande áreas com um menor esforço de rotação;
- Redução no tempo de troca da ferramenta;

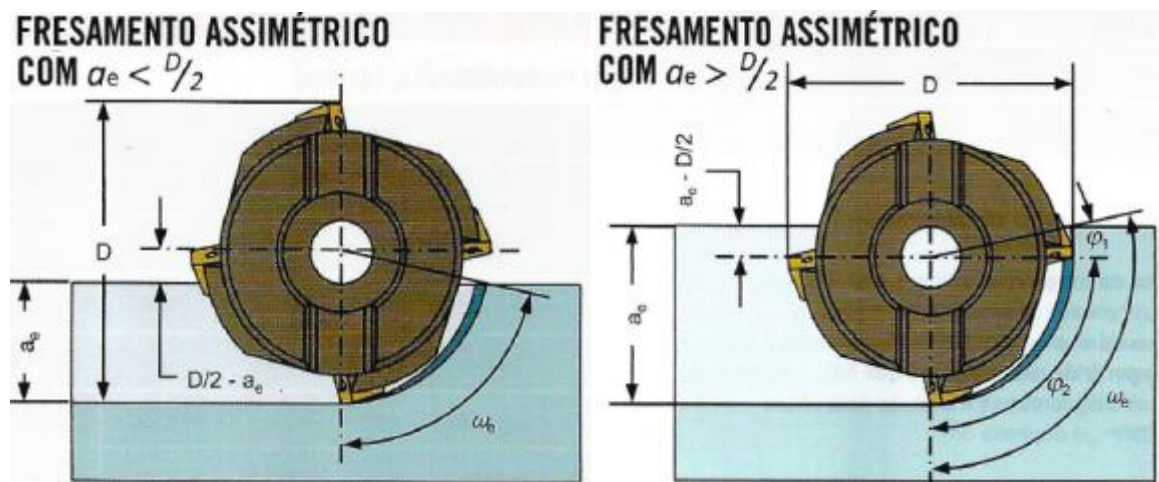
- Melhor desempenho na remoção de grandes quantidades de material;
- Melhor acabamento da superfície.

O fresamento frontal, tem como característica principal as marcas deixadas pelos dentes da fresa, conforme avanço por rotação (V_f) e por dente (f_z). A penetração de trabalho (a_e) é sensivelmente maior do que a profundidade de corte (a_p). (STEMMER, 2005).

3.3.2.2 Fresamento Simétrico e Assimétrico

Durante o processo de fresamento a posição da ferramenta em relação a peça pode variar e, neste ponto, torna-se importante o estudo do tipo de fresamento assimétrico que será utilizado, pois dependendo da assimetria escolhida, o contato entre as parte envolvidas ocorrerá de uma forma diferente o que pode trazer consequências tanto a peça – prejudicando a qualidade superficial, quanto a ferramenta – danificando alguma aresta de corte. É possível visualizar a diferença existente entre os dois tipos de fresamento assimétrico (Figura 1).

Figura 1: Tipos de fresamento assimétrico



Fonte: Seco (2015).

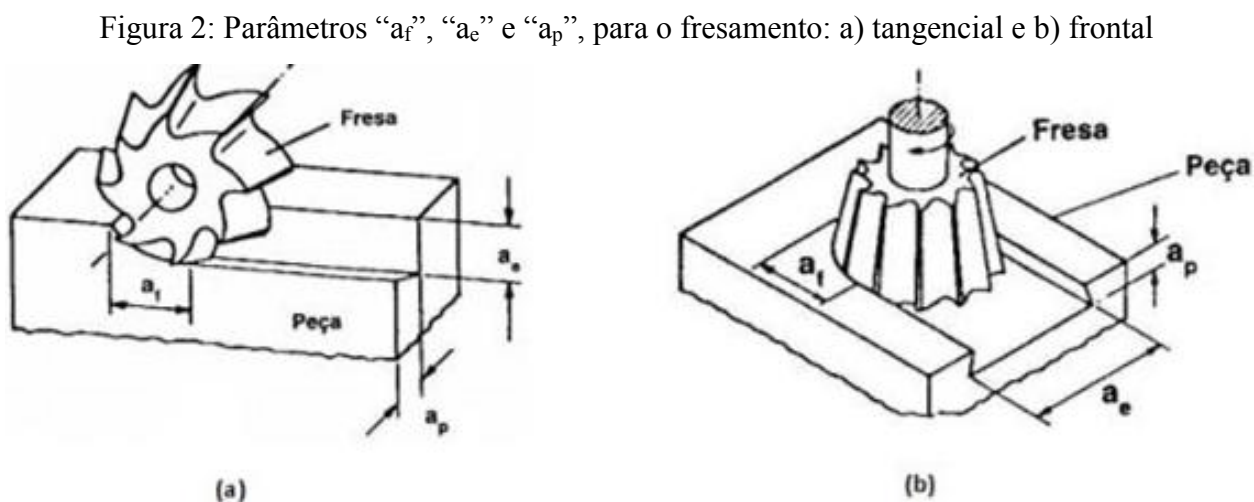
É possível compreender (Figura 1), que existem dois casos principais de assimetria, o primeiro deles ocorre quando o centro da fresa se localiza fora da peça, ou seja, a penetração de trabalho (a_e) é inferior ao raio da fresa. O segundo caso ocorre justamente quando o centro da fresa se localiza dentro da peça, ou seja, a penetração de trabalho (a_e) é maior do que o diâmetro da fresa.

3.3.2.3 Parâmetros de corte para o fresamento

Para realizar um bom processo de fresamento, é necessário que seja utilizada uma adequada relação dos parâmetros envolvidos neste movimento relativo entre peça e ferramenta. Alguns destes parâmetros devem ser escolhidos anteriormente ao processo de fabricação, como: profundidade da usinagem (a_p), penetração de trabalho (a_e) direção de avanço e corte, avanço por dente da fresa (f_z), velocidade de avanço (V_f), velocidade de corte (V_c), dentre os mais diversos fatores (MACHADO et al. 2009).

A profundidade ou largura de usinagem (a_p), pode ser definida no fresamento tangencial como a largura na qual a ferramenta avançará sobre a peça, já no fresamento frontal, este parâmetro tem relação com a profundidade de penetração da ferramenta na peça. Esta variável pouco influencia no desgaste da ferramenta, portanto pode-se utilizar valores relativamente altos de profundidade desde que não se perceba nenhuma alteração da vida útil da ferramenta. Os fatores que tem influência sobre a profundidade de corte são: a potência da máquina, as vibrações – consequência do processo de fresamento, e a rigidez do conjunto mecânico da máquina utilizada, da fixação realizada e da peça, além do acabamento superficial desejado para a peça final (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

É possível observar (Figura 2), os parâmetros: penetração de avanço (a_f), profundidade de corte (a_e) e penetração de trabalho (a_p) para os fresamentos do tipo tangencial e frontal.



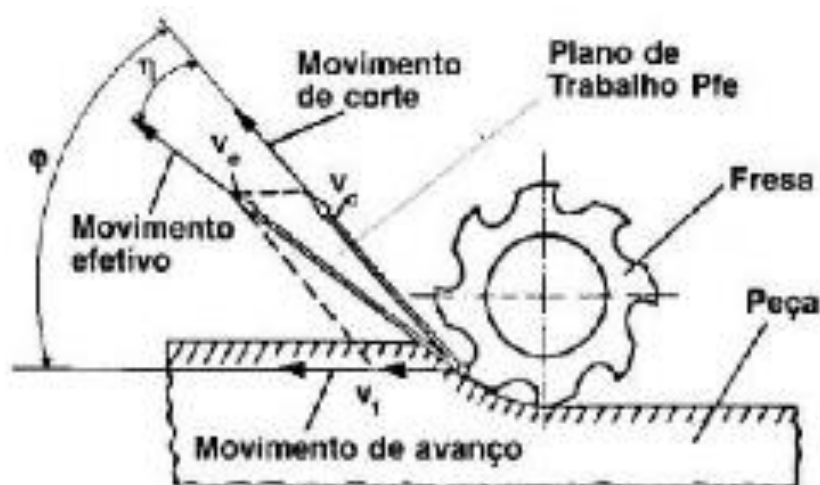
Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini, (2013).

O parâmetro de penetração de trabalho (a_e), refere-se a penetração da ferramenta com relação a peça, esta grandeza é medida no plano de trabalho de forma perpendicular a direção de avanço. Este parâmetro tem grande influência na vida da ferramenta de forma inversamente proporcional, portanto dependendo da rigidez do conjunto utilizado a melhor

escolha para um resultado satisfatório é realizar várias passadas para retirar o material, ao invés de realizar apenas uma. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; FERRARESI, 2013).

Abaixo (Figura 3), retrata os parâmetros de direção dos movimentos de avanço, corte e efetivo em um fresamento do tipo discordante.

Figura 3: Ilustração do movimento de avanço, corte e efetivo para um fresamento discordante



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (2013).

Já o parâmetro de avanço por dente da fresa (f_z) pode ser compreendido como o percurso de avanço de cada dente, sendo esta variável medida na direção do avanço e correspondendo a distância existente entre duas superfícies usinadas consecutivas. Para ter a melhor escolha desta grandeza deve-se levar em conta fatores como: o material da ferramenta, o tipo da fresa, etc. (MACHADO et al. 2009; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

A velocidade de avanço - V_f (Figura 3) é a velocidade instantânea do ponto da aresta cortante, na direção e sentido do avanço, e pode ser obtida pelo produto entre o avanço e a rotação da peça (MACHADO et al. 2009).

Já a velocidade de corte (V_c), pode ser definida como a velocidade tangencial instantânea que é resultado do movimento de rotação da fresa. É importante escolher com cautela este parâmetro pois ele possui grande influência no desgaste da ferramenta, já que o aumento deste parâmetro ocasionará maiores temperaturas e maiores forças de impacto entre a peça e a aresta de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

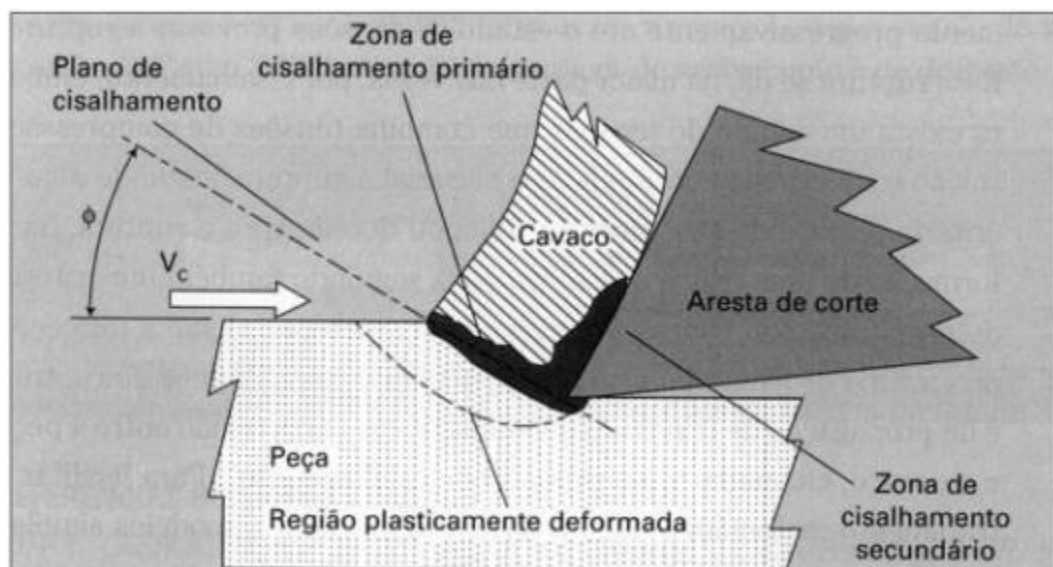
3.3.3 Mecanismos de formação de cavaco

O nome cavaco é dado ao material que é retirado da peça bruta através do cisalhamento forçado pela ferramenta sobre a peça. Durante o processo de formação do cavaco, diversos fatores influenciam o resultado final da usinagem, que será visto principalmente como o acabamento superficial, são eles: acabamento da peça, esforços de corte, desgastes da ferramenta, penetração do fluido de refrigerante, dentre outros (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Segundo Machado et. al., 2019, a formação de cavaco pode ser dividida, principalmente em quatro acontecimentos, são eles:

- **Recalque inicial:** Neste momento, a superfície de saída é responsável por pressionar uma pequena porção de material, que ainda está unido a peça. Isto ocorre devido a penetração da cunha cortante da ferramenta no material da peça.
- **Deformação e ruptura:** Este material pressionado inicia um processo de deformação elástica, que aumenta até se tornar uma deformação plástica. Este aumento progressivo de deformação segue, até que as tensões de cisalhamento envolvidas consigam iniciar um deslizamento entre planos. Abaixo (Figura 4) é possível notar o plano primário de escorregamento, plano entre a peça e o cavaco, definido pelo ângulo ϕ , que é conhecido como ângulo de cisalhamento e formado entre a direção da velocidade de corte (V_c) e o plano de cisalhamento.
- **Deslizamento das lamelas:** Visto que a ferramenta continua a penetração, é gerada uma ruptura que pode ser parcial ou completa, que dependerá principalmente da extensão da trinca gerada, na região do cisalhamento. Esta propagação indicará se o material rompido seguirá unido ao cavaco recém formado ou se as propriedades do material e as condições de corte quebrarão esta relação. Esta etapa é a responsável pela origem dos cavacos contínuos ou descontínuos.
- **Saída do cavaco:** Esta etapa é aonde se inicia o escorregamento do cavaco, devido ao movimento relativo ferramenta-peça. Durante este processo uma nova porção do material passa pelos mesmos processos já descritos e assim sucessivamente.

Figura 4: Mecanismos de formação de cavaco



Fonte: Machado et al. (2009).

Os quatro eventos descritos, são muito bem pronunciados em materiais dúcteis, isto ocorre, principalmente, devido a sua grande zona de deformação plástica, ou seja, o material retirado se deforma muito antes de haver de fato a ruptura. Para materiais frágeis, ou seja, que apresentam uma pequena zona de deformação plástica, o primeiro e segundo acontecimentos são bem curtos, enquanto no terceiro a ruptura do cavaco é total, o que causa a inexistência do quarto acontecimento, pois um cavaco de pequena dimensão é extraído rapidamente da região de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

3.3.3.1 Tipos e formas de cavaco

Segundo Ferraresi et. al., 2013, os cavacos podem ser divididos em três tipos principais, podendo ser: cavacos contínuos, de cisalhamento ou ruptura.

Os cavacos do tipo contínuo possuem lamelas justapostas continuamente e por isso não é possível notar, com nitidez, a distinção entre duas lamelas. Este tipo é resultado da usinagem de materiais dúcteis e homogêneos, formando longas fitas de material. O segundo tipo de cavaco é constituído por lamelas justapostas, porém facilmente distinguíveis. O último tipo analisado é resultado da usinagem de materiais frágeis, onde a ação do atrito entre as partes é menor, devido atrito entre a superfície de saída do cavaco e a superfície do próprio cavaco. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; FERRARESI, 2013).

Durante a usinagem de um aço com elevada dureza, com uma ferramenta que possui um ângulo de saída negativo, pode surgir um novo tipo de cavaco, denominado como cavaco segmentado. Este tipo de cavaco é resultado das grandes tensões de compressão que incorrem na ferramenta e na peça, durante o processo de usinagem e são estas tensões que promovem o aparecimento de trincas ao invés de ocorrer o processo de deformação plástica. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Segundo Stemmer et. al. (1993), para os cavacos de cisalhamento, o acabamento superficial da peça é de pior qualidade. Já os cavacos de formação contínua, segundo Stemmer et. al. (1993), são os mais desejáveis em termos de potência consumida e acabamento superficial, porém, é necessário nestes casos, utilizar quebra cavacos, já que segundo Machado et. al. (2009), quando ficam muito longos, estes cavacos podem causar acidentes e danos a superfície da peça.

Os cavacos contínuos e de cisalhamento, podem ser caracterizados segundo sua forma geométrica em: cavaco de fita, helicoidal, espiral, lascas ou pedaços (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; FERRARESI, 2013). Abaixo (Figura 5), existem sua classificação e demonstração de cada tipo como forme ilustrativa. Segundo a norma ISO 3685:1993.

Figura 5: Classificação das formas dos cavacos para a norma ISO 3685:1993

1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco helicoidal tipo arruela	5- Cavaco helicoidal cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
							
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conectado		
							
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
							
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			
							

Fonte: Adaptação de ISSO 3685 (1993).

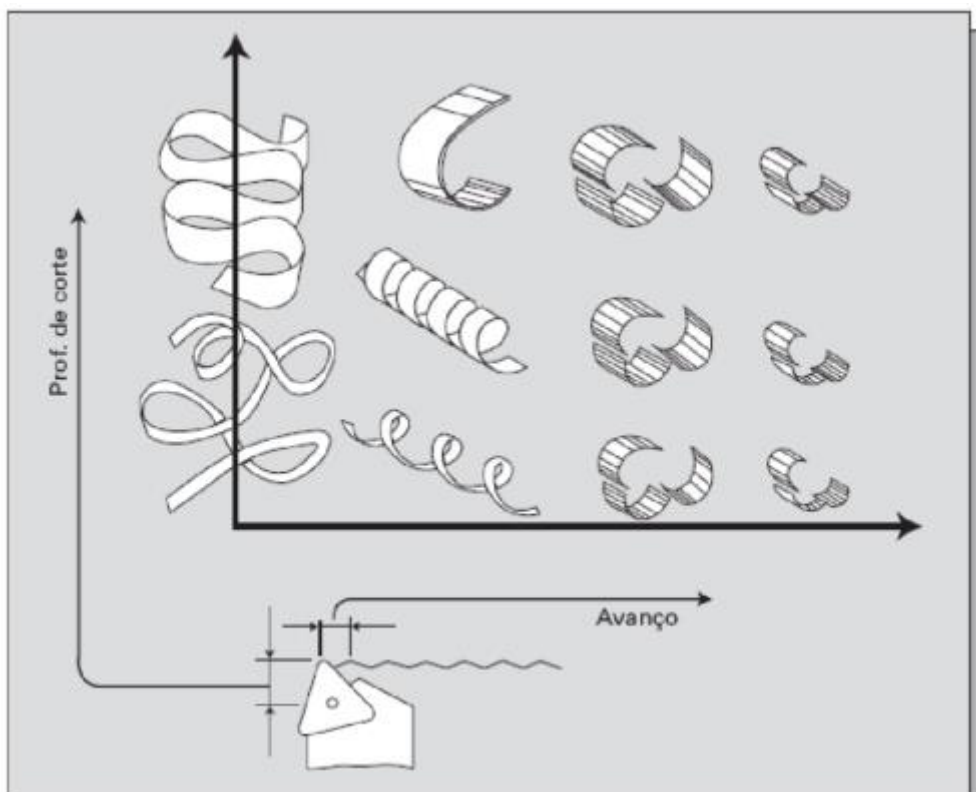
Dentre as peculiaridades de cada tipo de cavaco, os do tipo fita possuem alguns inconvenientes como o fato de poderem provocar acidentes, já que se assemelham a laminas

de corte, são mais difíceis em serem transportados e ocupam muito espaço (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; FERRARESI, 2013).

Os cavacos helicoidais são os mais convenientes, já que não possuem os pontos negativos do cavaco do tipo fita, além de não entupirem o bolsão de armazenamento de cavaco, devido ao seu volume e muito menos se aloca entre os dentes da fresa. Quando é necessária a remoção por meio de fluido refrigerante os cavacos em lascas possuem uma melhor aplicação.

Segundo Machado et. al. (2009), o parâmetro que possui a maior influência no formato do cavaco é o avanço, seguido pela profundidade de corte. Abaixo (Figura 6) existe um gráfico que ilustra a variação destes dois parâmetros e o respectivo cavaco gerado.

Figura 6: Correlação entre avanço e profundidade de corte para cada tipo de cavaco



Fonte: Machado et al. (2009).

3.4 FERRAMENTA DE CORTE

A grande procura por cortar peças de elevada dureza através dos processos de fresamento e/ou torneamento, tem gerado um crescimento nas exigências das ferramentas, já que elas devem suportar maiores cargas mecânicas, químicas e térmicas (DINIZ;

MARCONDES; COPPINI, 2013). Segundo Machado et. al., 2009, na região onde o cavaco é formado, estão envolvidas as maiores tensões de ruptura e as maiores temperaturas.

A ferramentas de corte devem possuir inúmeras características diferentes para atender a cada especificidade de um projeto, já que dependendo das variáveis existirão diferentes esforços. Por este motivo, nenhuma ferramenta existente no mercado atenderá a todas as propriedades necessárias no processo de usinagem e para isso é necessário existir uma seleção específica das características desejadas em cada operação, para um determinado material (MACHADO et al, 2009).

3.4.1 Materiais para ferramenta

Um bom material para ferramenta de usinagem, deve conter as seguintes propriedades: elevada resistência ao desgaste por atrito – já que o processo de usinagem se baseia do atrito; elevada dureza – para resistir melhor ao processo abrasivo; elevada resistência ao choque térmico – devido ao aumento da temperatura na região da aresta de corte; alta resistência a compressão e ao impacto – devido ao primeiro contato entre a peça e a ferramenta no processo; ser quimicamente inerte – para evitar uma contaminação na superfície da peça. Em suma, o material utilizado deve apresentar boas propriedades mecânica quando submetido a elevadas temperaturas. Dependendo da aplicação algumas propriedades podem ser encontradas juntas, porém estas características não se encontram em um único material (MACHADO et al, 2009).

A seleção do material da ferramenta é um fator crucial do desempenho do processo, sendo que esta seleção depende de fatores como: o material que se deseja usinar, condição da máquina, a natureza da operação de usinagem, dimensões do projeto da peça a ser usinada e da própria ferramenta, além do custo da ferramenta escolhida, etc., (FERRARESI, 2013).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013), os materiais para ferramenta podem ser divididos de acordo com suas características químicas, e estão listados abaixo em ordem crescente de dureza e conseqüente resistência ao desgaste:

- Aços rápidos;
- Aços rápidos com cobertura;
- Metal duro;
- Metal duro com cobertura;
- Cerâmica;

- Nitreto de boro cúbico (CBN);
- Diamante.

Diversos tipos de ferramentas foram desenvolvidas, durante os últimos anos, para suportar esta crescente demanda por maiores resistências. Dentre as diversas ferramentas e matérias desenvolvidos, cada uma possui aplicações especiais. As ferramentas cerâmicas, compostas por elementos óxidos ou não, são utilizadas na usinagem à seco devido a dureza que é característica de materiais cerâmicos.

Outro tipo, como as ferramentas constituídas de CBN - Nitreto Cúbico de Boro, também possuem vasta utilização, sendo que podem ser utilizadas inclusive em corte interrompido.

Para uma correta escolha do material da ferramenta é necessário levar em consideração os parâmetros envolvidos como: material e dimensões da peça a ser usinada além dos parâmetros de corte e refrigeração utilizados.

3.4.1.1 Metal Duro

Dentre os materiais listados, o metal duro é aquele de maior importância para a indústria moderna, já que este produto contém dureza a temperatura ambiente, dureza a quente e é bastante tenaz, além de possuir uma boa resistência ao desgaste. O metal duro é criado a partir da metalurgia do pó, onde é sinterizado com um ou mais metais ferrosos, como: ferro, níquel ou cobalto, que resultará em um corpo de elevada dureza e resistência a compressão. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Para melhorar o desempenho deste tipo de ferramenta durante a usinagem com materiais ferrosos, a ferramenta pode ser revestida. Este revestimento pode ser constituído de uma ou mais camadas, dependendo do que se deseja obter como resultado final, sendo o mais comum o uso do revestimento triplo (MACHADO et al., 2009).

Os metais duros, quando revestidos, possuem uma base tenaz e suas camadas aumentam a resistência a abrasão superficial. Com isso a ferramenta possui um cerne tenaz, com tenacidade e resistência ao desgaste, além de uma maior dureza a quente. (STEMMER, 1993; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

3.4.1.2 Cobertura por TiAlN e TiN

As ferramentas que vem ganhando mais espaço no mercado, são as de metal duro, revestidas, muito disso devido a sua boa relação entre custo e benefício. Estas ferramentas podem ser recobertas com TiAlN – Nitreto de Alumínio Titânio, sendo que o revestimento confere a ferramenta algumas características ligadas a resistência ao desgaste, temperatura, etc.

Dentre os diversos revestimentos existentes, o comporta à base de titânio e alumínio, TiAlN, tem vasta utilização nos processos de usinagem à seco, seja ele por torneamento ou fresamento. Materiais que apresentam este tipo de revestimento possuem uma maior resistência a oxidação, além do aumento da dureza, uma maior estabilidade química e uma menor condutividade térmica. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

O nitreto de titânio, TiN, apresenta algumas características como um menos coeficiente de atrito – seja ele com relação a peça ou ao cavaco, isto devido sua elevada resistência a abrasão. Quando recoberto por este tipo de cobertura, causa uma menor tendência de adesão em materiais ferrosos, portanto gera menores contatos entre a peça e a ferramenta ou o cavaco.

Através da aplicação de revestimentos, geralmente, é possível aumentar a vida útil da ferramenta (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2001).

3.4.2 Desgastes e avarias

Devido ao tipo de esforço, em grande parte dos processos de usinagem, as ferramentas estão sujeitas a mudanças graduais que podem diminuir a eficiência da ferramenta e até mesmo leva-la a falhar completamente (TRENT & WRIGHT, 2000). Estas mudanças graduais, que ocorrem principalmente na superfície de saída e de folga da ferramenta, são denominadas de desgaste e são causadas pelos mais diversos fatores, como: alta temperaturas ou concentração de tensões (FERRARESI, 2013; KALPAKJIAN e SCHMID, 2010). Para Machado et al, 2009 no decorrer do processo de usinagem, ocorre a mudança geométrica da peça, por perda de massa, já que essa perda acontece de forma contínua porém progressiva.

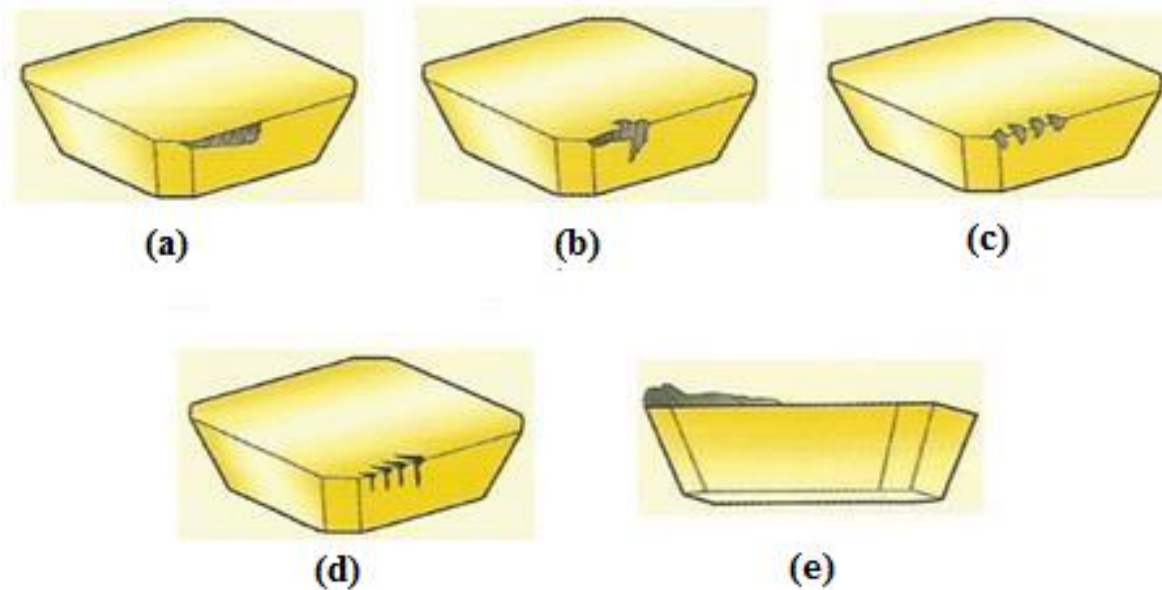
Os fatores principais, que mais favorecem o desgaste são: abrasão, deformação plástica, oxidação do material, difusão entre o material da ferramenta e da peça, aderência de material estranho na superfície da ferramenta e correntes elétricas iônicas formadas pelo atrito ferramenta-peça (STEMMER, 1993).

São considerados desgastes aqueles processos que ocorrem no decorrer de um tempo prolongado. Avarias, são vistas como processos mais repentinos, em que o período de tempo

é mais reduzido. Segundo os autores Diniz, Marcondes e Coppini (2013), os desgastes e avarias mais comuns são:

- **Desgaste de flanco:** Este tipo de desgaste está ilustrado (Figura 7a), e ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo atrito entre esta superfície e a superfície já usinada (KALPAKJIAN e SCHMID, 2010). Este tipo de desgaste ocorre em toda usinagem, devido ao atrito. Este desgaste causa a deterioração da peça, além de prejudicar o acabamento superficial e a tolerância da peça, já que modifica a forma da aresta de corte. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).
- **Desgaste de entalhe:** Ilustrado (Figura 7b), ocorre na extremidade de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, devido principalmente a exposição com o ar. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Não há muita certeza com relação a formação deste tipo de desgaste, porém acredita-se que ele é causado devido ao atrito entre aos óxidos que se formam na ferramenta, gerados por atrito. (MACHADO et al., 2009).
- **Lascamento:** Já este tipo de desgaste, como ilustrado (Figura 7c), ocorre, segundo Stemmer et. al. (1993), por conta das solicitações térmicas ou mecânicas sobre a peça na aresta. Pode ser evitado ou reduzido, variando-se o ângulo de saída para valores negativos, quando se utiliza pastilhas de cerâmica ou metal duro.
- **Trincas:** Demonstradas em mais detalhes (Figura 7d), este tipo de desgaste pode ser ocasionado por fatores térmicos ou mecânicos. Quando as trincas são do primeiro tipo, um gradiente de temperatura grande está ocorrendo entre a aresta de corte (ponto de maiores temperaturas) e o decorrer da ferramenta, o que causa uma dilatação e contração maiores da ferramenta, ocasionando em trincas. Já no caso das trincas mecânicas, sua causa está na variação brusca dos esforços envolvidos. No primeiro tipo, as trincas são perpendiculares a aresta de corte e no segundo, as trincas são paralelas a aresta. Nos dois casos, as trincas são favorecidas por fatores como: má distribuição do fluido de corte, corte interrompido, variação na espessura de corte, dentre outros, (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).
- **Aresta postiça de corte (APC):** Este tipo de desgaste ocorre devido a uma camada de cavaco que se forma sob a aresta de corte e acaba, modificando o comportamento da ferramenta em relação ao acabamento da peça, ao desgaste da ferramenta e à força de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Figura 7: Desgastes e avarias comuns



Fonte: Seco Tools AB (2016).

Outros tipos comuns de desgaste e avaria são:

- **Desgaste de cratera:** Geralmente ocorre na superfície de saída e é ocasionado devido ao atrito entre a ferramenta e o cavaco. O aumento da cratera leva a quebra da ferramenta. Quando o material da ferramenta é constituído de metal duro revestido, cerâmica, ou o material a ser usinado é frágil, este tipo de desgaste não pode ocorrer (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).
- **Deformação plástica:** Esta avaria pode ocorrer devido ao deslocamento do material da ferramenta. A deformação ocorre por cisalhamento como consequência das altas tensões nas superfícies da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).
- **Quebra:** Pode ser ocasionada por conta do aumento excessivo dos desgastes e das avarias que uma ferramenta pode estar submetida. Algumas vezes, por uma determinada peculiaridade, a quebra pode ocorrer, como nos casos em que foi aplicado uma carga excessiva ou quando a ferramenta é muito dura. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

3.5 RUGOSIDADE

Grande parte dos estudos em usinagem, tem como objetivo qualificar a qualidade das peças produzidas, analisando as imperfeições e a topografia deixada sobre a superfície usinada. A esta topografia, resultado do processo de usinagem, é dado o nome de rugosidade e tem como característica os erros micro geométricos decorrentes do processo de usinagem (AGOSTINHO, 1981).

Após o processo de usinagem, é possível observar com auxílio de um microscópio as marcas deixadas pelo processo de remoção do material, que ocasiona certas irregularidades. Por conta disto, vê-se a importância em analisar este parâmetro de acabamento superficial, já que está intimamente ligado a precisão dimensional da peça, que aumenta conforme é exigido uma maior funcionalidade da peça (PALMA, 2006).

A rugosidade é um parâmetro que caracteriza as irregularidades existentes em uma superfície, que surgem devido ao processo de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Esse fenômeno ocorre por meio da relação entre as marcas do avanço da ferramenta e aos fragmentos de material que compõem a APC e acabam por ficarem acamados na peça no decorrer do processo de formação do cavaco (STEMMER, 1993). Alguns parâmetros ajudam no processo de formação do cavaco, são eles: as propriedades do material usinado, geometria da ferramenta, conjunto máquina-ferramenta, dentre outros (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Segundo Stemmer et. al., 1993, alguns fatores são responsáveis por interferir na rugosidade, como:

- Aumento do ângulo de saída, pois dificulta a formação da APC, melhorando o acabamento superficial;
- Reduzir o avanço, diminuí a interferência da altura das raias;
- Aumento da velocidade de corte, pois dificulta a formação da APC.

O controle da rugosidade é essencial para produzir uma peça com melhor qualidade superficial, já que peças com melhor acabamento, possuem maior vida quando submetidas a esforços de fadiga, já que em superfícies rugosas o acúmulo de concentrações de tensões é mais comum, o que favorece ao aparecimento de trincas de fadiga, portanto, quanto melhor o acabamento – rugosidade de uma peça, maior sua resistência mecânica a fadiga (SMITH e HASHEMI, 2012).

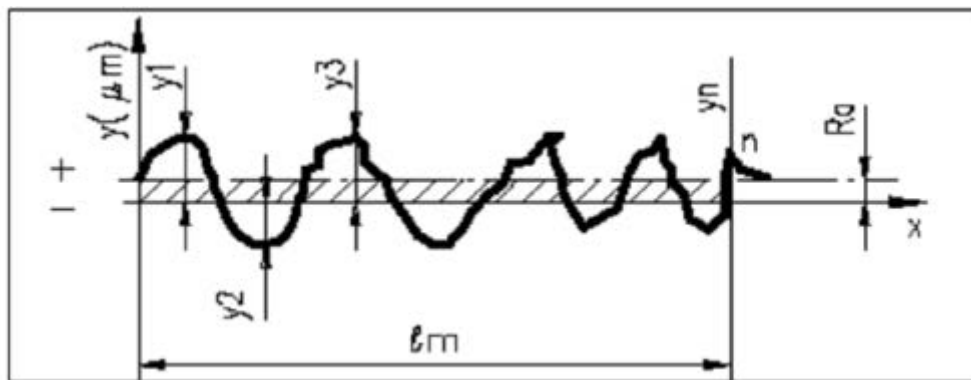
Atualmente as indústrias vêm dando maior importância ao acabamento superficial e precisão dimensional das peças usinadas, por isso medir e caracterizar o acabamento das superfícies, torna-se o diferencial no processo de usinagem (REDDY e RAO, 2005).

Inúmeras são as maneiras de quantificar a rugosidade de uma superfície usinada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Segundo Machado et al., 2009, o parâmetro mais utilizado pela indústria, é o de rugosidade média (R_a).

3.5.1 Rugosidade média (R_a)

A rugosidade média, consiste em uma análise em um comprimento de amostragem. Esta medida representa a média dos valores absolutos das ordenadas (Figura 8). Este parâmetro é disponível em instrumentos de medição mais simples, porém como se trata de uma média, este valor não é capaz de identificar algumas características da superfície (MACHADO et al., 2009).

Figura 8: Rugosidade média (R_a)





Fonte: Carpinetti et al. (1996).

As informações da rugosidade esperada para cada processo de fabricação, estão abaixo (Quadro 1). É nela que se delimita os valores mínimos e máximos que são esperados em um processo de fabricação, foi por meio dele que no trabalho foi definido uma qualidade adequada ou não para cada processo de fabricação, ou seja, foi tomado como base os valores definidos aqui para definir se um processo de fabricação estava adequado. No Quadro 2, é possível perceber a recomendação de rugosidade para um determinado material dependendo de sua aplicação (CATAPAN, 2013), ou seja, a rugosidade que é esperada em determinada aplicação, como: $R_a = 4 \mu\text{m}$ sendo característica de uma superfície desbastada por operações de usinagem.

Quadro 1: Rugosidade média (R_a), esperada para cada processo de usinagem

R_a (μin)	2000	1000	500	250	125	63	32	16	8	4	2	1	0,5
R_a (μm)	51	25,4	12,7	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025	0,013
R_q (μin)	211,2	105,6	52,8	26,5	13,4	6,6,2	3,5,5	1,6,8	8,4	4,1	2,06	1,03	0,52
R_q (μm)	53,6	26,8	13,4	6,7	3,4	1,68	0,86	0,42	0,21	0,105	0,053	0,026	0,013
R_{ms} (μin)	—	—	—	590	406	209	103	50	24	12	5,9	2,9	1,5
R_{ms} (μm)	—	—	—	15	10,3	5,3	2,7	1,25	0,60	0,30	0,15	0,07	0,04

Corte por chama	Application less common	Usual application range											
Moldagem em areia	Application less common	Usual application range											
Laminação a quente	Application less common	Usual application range											
Forjamento		Application less common	Usual application range										
Plainamento		Application less common	Usual application range										
Rasquetamento	Application less common	Usual application range											
Corte de serra	Application less common	Usual application range											
Furação		Application less common	Usual application range										
Usinagem química		Application less common	Usual application range										
Corrosão eletrolítica		Application less common	Usual application range										
Fresamento		Application less common	Usual application range										
Torneamento/Mandrillamento		Application less common	Usual application range										
Brochamento			Application less common	Usual application range									
Alargamento			Application less common	Usual application range									
Moldagem em coquilha			Application less common	Usual application range									
Moldagem de precisão			Application less common	Usual application range									
Extrusão		Application less common	Usual application range										
Laminação a frio			Application less common	Usual application range									
Moldagem sob pressão				Application less common	Usual application range								
Retífica				Application less common	Usual application range								
Espelhamento					Application less common	Usual application range							
Polimento eletrolítico						Application less common	Usual application range						
Rolagem						Application less common	Usual application range						
Polimento							Application less common	Usual application range					
Lapidação								Application less common	Usual application range				
Super acabamento									Application less common	Usual application range			

	Aplicação menos comum	R_a = Rugosidade média	R_{ms} = Rugosidade máxima
	Campo de aplicação usual	R_q = Desvio médio quadrático	μm = microns / μin = micro polegadas

Fonte: Adaptado de Seco Tools AB (2016).

Quadro 2: Rugosidade média (R_a) em função da aplicação

R_a (μm)	APLICAÇÕES
0,01	Blocos padrão, réguas triangulares de alta precisão, guias de aparelhos de medida de alta precisão.
0,02	Aparelhos de precisão, superfícies medidas em micrômetros e calibradores de precisão.
0,03	Calibradores, elementos de válvulas de alta pressão hidráulica.
0,04	Agulhas de rolamentos, super-acabamento de camisa de bloco de motor.
0,05	Pistas de rolamentos, peças de aparelhos de controle de alta precisão.
0,06	Válvulas giratórias de alta pressão, camisas de blocos de motores.
0,08	Agulhas de rolamentos de grandes dimensões, colos de virabrequim.
0,1	Assentos cônicos de válvulas, eixos montados sobre mancais de bronze ou teflon a velocidades médias, superfícies de cames de baixa velocidade.
0,15	Rolamentos de dimensões médias, colos de rotores de turbinas e redutores.
0,2	Mancais de bronze, náilon, etc., cones de cubos sincronizadores de caixas de câmbio de automóveis.
0,3	Fiancos de engrenagens, guias de mesas de máquinas-ferramentas.
0,4	Pistas de assentamento de agulhas de cruzetas em cardas, superfície de guia de elementos de precisão.
0,6	Válvulas de esferas, tambores de freio.
1,5	Assentos de rolamentos em eixos com carga pequena, eixos e furos para engrenagens, face de união de caixas de engrenagens.
2	Superfícies usinadas em geral, eixos, chavetas de precisão, alojamentos de rolamentos.
3	Superfícies usinadas em geral, superfícies de referência e apoio.
4	Superfícies desbastadas por operações de usinagem.
5 a 15	Superfícies fundidas, superfícies estampadas.
> 15	Peças fundidas, forjadas e laminadas.

Fonte: Catapan (2013).

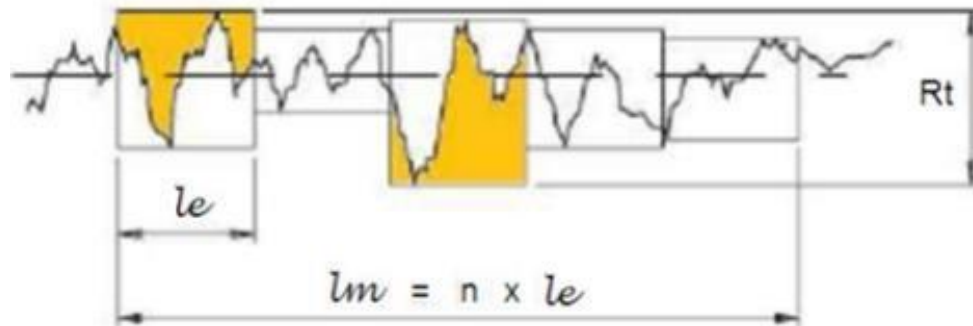
O parâmetro R_a , segundo a norma ISO 4287:2002, é utilizado internacionalmente para a determinação e quantificação da rugosidade, segundo a norma, o parâmetro R_a corresponde à média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento da amostragem.

3.5.2 Rugosidade total (R_t)

Para um comprimento de análise, a rugosidade total (R_t), representa o valor de medição entre o maior vale e o maior pico (MACHADO et al., 2009; ABNT NBR 4287: 2002). Devido sua diferente análise, este parâmetro é influenciado por qualquer irregularidade

significativa presente em uma superfície (MACHADO et al., 2009). Na Figura 9, encontra-se a forma de medição do parâmetro (R_t).

Figura 9: Rugosidade Total (R_t)



Fonte: Piratelli Filho (2011).

O parâmetro R_t , é resultado da altura total do perfil, que é obtido através da soma da altura do maior pico e da profundidade do maior vale para o comprimento usinado (KALPAKJIAN e SCHMID, 2010).

3.6 POTÊNCIA DE USINAGEM

Uma máquina-ferramenta ao rotacionar seu eixo, para executar o movimento de avanço e de corte, gera potência (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Para Machado et al., 2009 e Ferraresi, (2013), a potência é obtida pelo produto das componentes da força de usinagem em questão, com a respectiva componente de velocidade.

Segundo a norma ABNT NBR 12545: 1991 a potência pode ser subdividida em:

- **Potência efetiva:** O produto entre a força efetiva (F_e) e a velocidade efetiva (V_e), ou então, a soma das potências de corte (P_c) e de avanço (P_f);
- **Potência de corte:** O produto entre a força de corte (F_c) e a velocidade de corte (V_c);
- **Potência de avanço:** O produto entre a força de avanço (P_f) e a velocidade de avanço (V_f).

Como a velocidade de avanço (V_f) é muito pequena, quando comparada com a velocidade de corte (V_c), a respectiva potência de avanço é praticamente desprezível (SECO TOOLS, 2016). Portanto a potência de usinagem pode ser igualada a potência de corte.

Segundo a Seco Tools AB (2016), a força de corte F_c é diretamente proporcional a potência de corte P_c . A força pode ser definida como, a força necessária para remover 1 mm^2 de cavaco do material analisado. As principais influências desta força são: seção de corte realizada, geometria de ferramenta, rigidez de ferramenta, material da peça, velocidade de corte e ângulo de posição da aresta de corte.

A redução desta potência, portanto, é capaz de gerar um processo mais sustentável segundo Kant e Sangwan (2014), porém deve se atentar para com a redução da qualidade superficial da peça, já que uma redução desta força poderia aumentar a rugosidade, gerando mais retrabalho e perdas durante o processo.

Devido as características do processo de fresamento, a potência consumida durante o processo varia constantemente por conta da espessura do cavaco e do número de dentes da castanha. A potência, pode ser calculada, tomando por base a Equação (1) de potência média para o fresamento. Nesta fórmula, já é levada em conta o valor médio da espessura do cavaco e o valor da constante K_s - Equação (2), que representa o material da peça.

$$P_c = K_{sm} \cdot a_e \cdot a_p \cdot v_f / 60 \cdot 10^6 \text{ [kW]} \quad (1)$$

$$K_{sm} = K_{s1} \cdot h_m^{-z} \quad (2)$$

Onde, temos:

P_c : Potência média de corte consumida pelo processo.

K_{s1} : Constante relativa ao material da peça.

h_m : Espessura média do cavaco.

De forma experimental, é possível medir os valores de tensão e corrente durante um processo de usinagem para realizar o cálculo da potência. A tensão pode ser obtida por intermédio de voltímetros e a corrente por uso da amperímetros na entrada da máquina. Nestes casos pode haver intrusão, sendo este problemas apenas corrigido, quando são utilizados no lugar, sensores de Efeito Hall – externamente aos cabos elétricos (MACHADO et al., 2009).

3.7 EMISSÃO ACÚSTICA

A emissão acústica (EA) é um conjunto de ondas elásticas transientes formadas devido à rápida liberação de energia a partir de uma fonte, localizada ou não, quando esta é submetida ao estresse (GUO; AMMULA, 2005). Assim, podemos dizer que: a EA é constituída por uma onda de tensão, que é resultado de uma liberação repentina de energia de deformação, que se propagará através do material (LI, 2002). Ou seja, quando um corpo sofre alguma modificação permanente ele emite um som (MAIA et al., 2015).

Levando em consideração que as deformações de uma ferramenta causam uma piora da qualidade superficial, afetando a rugosidade da peça, é interessante desenvolver métodos, sejam eles diretos ou indiretos, para monitorar este desgaste, de forma a ter um maior controle do processo. Dentre os métodos indiretos para a detecção de desgaste, o da EA é o mais eficaz, pois a faixa de frequência é superior a ruídos ambientais e as vibrações da máquina, sendo que o processo não interfere na operação de corte (LI, 2002).

3.8 EMISSÃO SONORA

Diferente da emissão acústica a emissão sonora é obtida por intermédio de um decibelímetro, aparelho que é responsável por medir a intensidade de uma determinada onda sonora. É por intermédio deste aparelho que é realizada a medição, em dB, que compõem uma escala logarítmica. O som captado por este aparelho é medido por ressonância, já que internamente ao aparelho existe um oscilador que vibra conforme as onda sonoras a que é exposto. Segundo a NBR 10.151:2000 o valor máximo para que a saúde humana não seja comprometida é de 120 dB.

3.9 VIBRAÇÃO

A vibração é o principal responsável pelo acabamento superficial e pelas condições de usinagem, sendo que a vibração é o maior obstáculo para conseguir conciliar o aumento da produtividade e uma qualidade superficial aceitável (SONG et al., 2014; VIKRAM; RATNAM; NARAYANA, 2016).

Num processo de usinagem, são comuns dois tipos de vibração: vibração forçada e vibração auto excitada. Na primeira, a excitação é causada por conta de forças presentes na máquina ferramenta e que ocorrem de forma periódica. Já na vibração auto excitada ou trepidação é onde se encontra o maior esforço em se compreender melhor o processo de

vibração, pois esta resulta do processo de interação entre a remoção do cavaco e a estrutura da máquina ferramenta (KALPAKJIAN e SCHMID, 2010).

Dentre os dois tipos de vibração citados, a trepidação é a mais significativa, pois ela causa efeitos adversos durante o processo de usinagem, que reduzem a vida da ferramenta, afetando a qualidade superficial final e limitando a produtividade (DESHPANDE; FOFANA, 2001; MORADI et al., 2015; WEREMCZUK; RUSINEK; WARMINSKI, 2015). Por conta disto, é necessário analisar e controlar este fator, afim de aumentar a produtividade e reduzir os custos de produção. É necessário portanto analisar as possíveis interações entre a peça e a ferramenta e selecionar a melhor condição de corte, utilizando os parâmetros de usinagem apropriados (DESHPANDE; FOFANA, 2001).

Segundo Kalpakjian e Schmid (2010), as trepidações são proporcionais às forças de corte, largura, profundidade e a natureza do material.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CORPOS DE PROVA UTILIZADOS

O material utilizado para estudo nesta pesquisa foi o aço AISI 4340. Ele foi adquirido na forma bruta, com dureza variando de 201 a 227 HB (menor que 20 HRC). A composição química certificada do aço adquirido está disposto abaixo (Tabela 3).

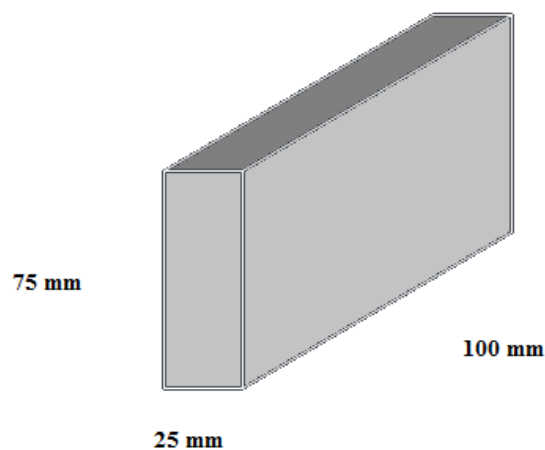
Tabela 2: Composição química do aço SAE 4340 utilizado

ABNT/SAE	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	P	S	Cu	Al
4340	0,40	0,63	0,22	1,66	0,73	0,22	0,015	0,014	0,15	0,037

Fonte: Aatoria Própria

Utilizou-se para a pesquisa peças bruta de aço AISI 4340 com 100 mm de comprimento, 75mm de largura e 25mm de espessura (Figura 10), que foi adquirida junto à empresa GGD Metals (São Paulo SP), representante Gerdau. Estas amostras foram tratadas termicamente na Empresa Proterm na cidade de São José dos Campos e atingiram a dureza especificada de pré-estabelecida de 56 HRC (615 HV).

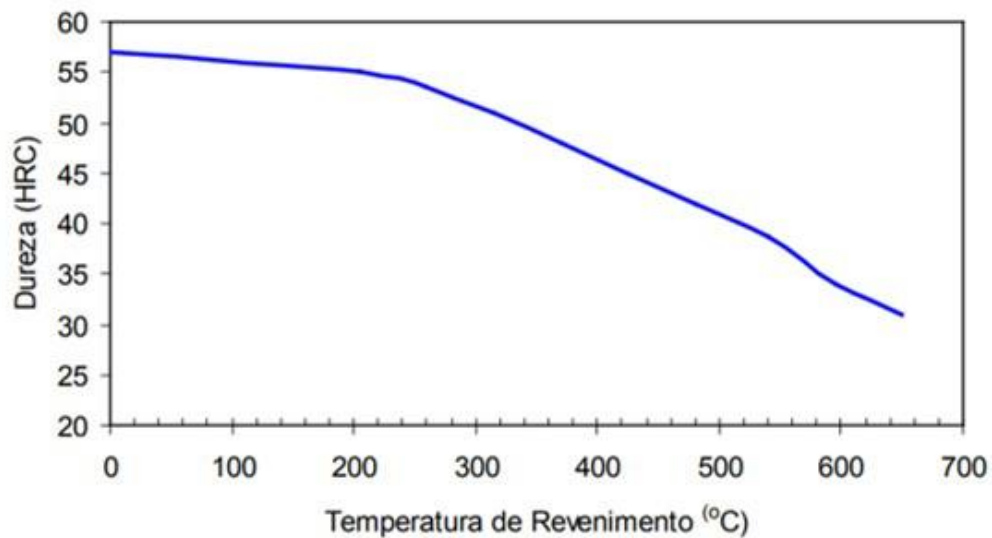
Figura 10: Esquema do corpo de prova utilizado



Fonte: Aatoria Própria

O material foi tratado termicamente, seguindo orientações do catálogo do material, da GGD Metals cuja têmpera foi realizada a 850°C para austenitização por 2 horas, devido ao diâmetro de 125 mm da peça. O revenimento, realizado quando o material resfriou até 70°C. Para esse processo, foi mantida a temperatura de 150°C por 2 horas (mínimo recomendado, sendo pelo menos 1 hora para cada 25mm de espessura), para o alívio de tensões. O tempo e a temperatura foram escolhidos de forma que, ao final do processo, o material possuísse uma dureza de aproximadamente 56 HRC (Figura 11).

Figura 11: Curva de revenimento, para têmpera a partir de 850°C



Fonte: GGD Metals (2018).

4.2 PROCESSO DE USINAGEM

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Estudos sobre Usinagem na Unesp em Guaratinguetá. Foi utilizado um Centro de Usinagem marca DMG modelo DMU50ECO série DMG Ecoline (Figura 12).

Figura 12: Centro de usinagem DMG Ecoline



Fonte: Autoria Própria

Vale ressaltar, que foi instalado neste centro de usinagem o sistema de aquisição de dados, para a captação das variáveis de saída, como potência, vibração e emissão acústica.

4.3 FRESAMENTO

O processo de usinagem utilizado nesta pesquisa foi o fresamento frontal assimétrico – levando em consideração seus dois tipos, ambos à seco, para cada uma das condições. Foram utilizadas, ao todo, 9 ferramentas de metal duro do tipo PVD revestido com TiAlN e TiN sobre metal duro, cada uma destas ferramentas possuía 4 arestas de corte.

As duas condições que eram o foco deste estudo, foram obtidas posicionando o centro da fresa fora da peça, e posicionando o centro da fresa no interior da peça. Na primeira a largura de usinagem (a_e), era inferior ao raio da fresa e na segunda a largura de usinagem (a_e), era maior que o raio da fresa.

No estudo foram variados as velocidades de corte e de avanço, mantendo-se constante a profundidade de corte. Na Tabela 4 e Tabela 5, é possível encontrar os valores que foram utilizados para velocidade de corte, velocidade de avanço.

Tabela 3: Condições de V_c para as duas condições de simetria analisadas

Condição	1	2	3
V_c [m/min]	150	200	250

Fonte: Autoria Própria

Tabela 4: Condições de V_f para as duas condições de simetria analisadas

Condição	1	2
f [mm/rot]	0,1	0,2

Fonte: Autoria Própria

Estas velocidades, foram combinadas juntamente com a condição de simetria de $1/3 \varnothing$ da largura de usinagem (a_e) – que caracterizava uma condição assimétrica e com $2/3 \varnothing$ da largura de usinagem (a_e) – que caracterizava uma condição simétrica.

Combinando todos os parâmetros para compor um fatorial completo, é possível construir a Tabela 6, que representa a base na qual todos os ensaios foram realizados.

Tabela 5: Fatorial completo de todos os ensaios realizados

Ensaio	Posição da ferramenta	L_f [mm]	V_c [m/min]	f [mm/rot]	a_p [mm]
1	1/3	98	150	0,1	1
2	1/3	98	150	0,2	1
3	1/3	98	200	0,1	1
4	1/3	98	200	0,2	1
5	1/3	98	250	0,1	1
6	1/3	98	250	0,2	1
7	2/3	98	150	0,1	1
8	2/3	98	150	0,2	1
9	2/3	98	200	0,1	1
10	2/3	98	200	0,2	1
11	2/3	98	250	0,1	1
12	2/3	98	250	0,2	1

Fonte: Autoria Própria

Comprimento de Corte (L_c):

Para calcular o valor de L_c , foi utilizada a equação proposta por Garcia (2005). Nesta o valor L_c é calculado com base no comprimento do arco em cada giro da fresa (L_{cf}), no

comprimento da amostra (L_n) e na taxa de avanço (f). O valor de (L_{cf}), pode ser determinado de acordo com o ângulo de engajamento (α_e) e com o diâmetro da fresa (D). As equações de L_c e L_{cf} estão representadas abaixo pelas equação (3) e equação (4).

$$L_{cf} = \frac{\alpha_e \cdot \pi \cdot D}{360} \quad (3)$$

$$L_c = \frac{L_{cf} \cdot N \cdot L_n}{f} \quad (4)$$

Onde: $\alpha_e = 180^\circ$; $D = 25 \text{ mm}$.

4.3.1 Ferramentas e suporte

As ferramentas que foram utilizadas na composição da fresa, foram ferramentas de metal duro do tipo PVD com recobrimento de TiAlN e TiN. O material base das ferramentas era o metal duro do tipo PVD.

As ferramentas utilizadas eram do tipo inserto intercambiável em uma fresa de 3 dentes. Ou seja, as ferramentas era fixadas na fresa e possuíam ferramentas dispostas a 120 graus uma das outras.

As pastilhas foram fornecidas pelo Seco Tools e eram do tipo XOMX10T308TR-ME07, com 4 arestas de corte.

Na Figura 13, represento a ferramenta utilizada durante o processo de usinagem, onde a espessura da cobertura por TiAlN era de $1,8 \mu\text{m}$ e a de TiN era de $0,2 \mu\text{m}$.

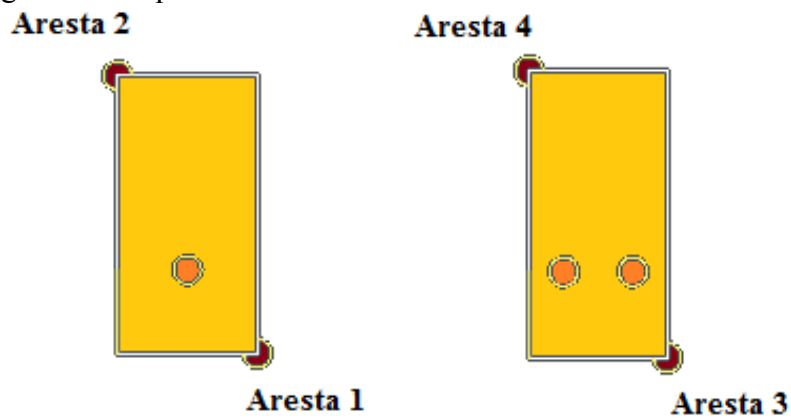
As arestas foram numeradas, para que pudessem ser analisados os respectivos desgastes (Figura 14), onde é mostrado a frente e o verso de uma ferramenta genérica, com as respectivas arestas de corte.

Figura 13: Ferramenta utilizada – Vista frontal, Lateral 1 e Lateral 2.



Fonte: Autoria Própria

Figura 14: Esquema da ferramenta utilizada – Lateral 1 e Lateral 2



Fonte: Autoria Própria

É importante ressaltar que a cada passagem da fresa, era necessário retirar a fresa do magazine de ferramentas do centro de usinagem e trocá-la, afim de que a nova usinagem fosse realizada com uma nova pastilha.

Foi utilizado um suporte SECO R217941225.RE-08-3A e um porta pinças SECO - EPB E3476 5820 1260 (Figura 15).

Figura 15: Fresa utilizada – Suporte (a) e Pinça (b)



Fonte: Soares, 2017

4.3.2 Aquisição de dados

As variáveis de potência de corte, emissão acústica e vibração, foram coletadas durante os ensaios e armazenadas por um computador no momento em que eram realizados os testes. O sistema utilizado é capaz de converter qualquer variável física, por intermédio de sensores ou transdutores, em sinais elétricos que são captados por uma placa específica.

Esta placa é da marca National Instruments, modelo NI PCI 6220, e ela tem como função converter os sinais analógicos, enviados pelos sensores e transdutores, em sinais digitais que são armazenados pelo computador ligado a placa.

Esta conversão foi realizada pelo software LabView® 7.1, também da National Instruments, em um programa específico.

4.3.3 Potência de corte

Para a aquisição da potência consumida, do motor do centro de usinagem, serão usados sensores de transdução de corrente da marca LEM modelo AT 100 B10. A Figura 17 representa o sensor utilizado.

Figura 16: Sensor de transdução de corrente da marca LEM modelo AT 5 B10



Fonte: RS Delivers (2019).

O sinal captado por este sensor, na entrada da máquina, é encaminhado a placa de aquisição de dados que faz a respectiva conversão do sinal analógico e o transforma, a partir da equação (5), na unidade de potência (Watts).

$$P_c = I \times U_f \times F_p \times \sqrt{3} \quad (5)$$

Onde, temos:

P_c : Potência consumida, em Watts;

I : Corrente alternada, em Ampéres;

U_f : Tensão de uma fase, em Vots;

F_p : Fator de potência

O sensor gera uma tensão de 0 a 10 Volts (V_{cc}), que é proporcional a corrente de entrada em uma fase do motor. Como o sinal já convertido possui uma proporção em relação a corrente de entrada, é necessário convertê-lo para utilizar a equação (7).

Para realizar a conversão o fabricante do sensor fornece a equação (6), descrita abaixo.

$$I = V_{cc} * 10 \quad (6)$$

Onde:

I : Corrente em Ampéres de uma das fases;

V_{cc} : Tensão de corrente contínua, em Volts;

$$P_c = V_{cc} * 10 * 0,92 * 220 * \sqrt{3} \quad (7)$$

4.3.4 Emissão acústica

O sistema utilizado para realizar a captação da intensidade da emissão acústica é da marca Physical Acoustics Corporation, que conta com o sensor R15A e um amplificador de sinal 1272-1000 com uma saída retificada para RMS, valor quadrático médio (Figura 17).

Figura 17: Sistema de captação da emissão acústica da marca Physical Acoustics Corporation



Fonte: Aatoria Própria

4.3.5 Vibração

Para realizar a captação dos dados de vibração, foi utilizado um sensor da marca Vibro Control, modelo TV-100. Este sensor enviará a placa de aquisição de dados as informações analógicas, e ela converterá os dados para informações digitais, para que se possa ser analisado, abaixo está representado o sensor utilizado (Figura 18).

Figura 18: Sensor de vibração modelo TV-100



Fonte: Aatoria Própria

Os valores obtidos em V_{cc} , por conta do sensor e da placa de aquisição, precisam ser convertidos para a velocidade em [mm/s] pela Equação 8.

$$v = \frac{25 \cdot V_{cc}}{8} \quad (8)$$

4.3.6 Emissão Sonora

Durante o processo de usinagem, foi utilizado um decibelímetro para medir os ruídos da potência em vazio – potência onde o centro de usinagem estava apenas ligado e não realizando uma usinagem, e da potência durante o processo de corte. Os valores obtidos foram anotados em uma tabela e descontados de seus respectivos valores em vazio para análise.

4.3.7 Desgaste da ferramenta

Durante o processo de usinagem, foram utilizadas 9 ferramentas no total, assim ficou preservada a condição de desgaste de cada uma das 3 arestas da ferramentas da fresa, em cada passagem nas condições anteriormente mencionadas. Para avaliar cada condição de desgaste e avaria, utilizou-se de um microscópio de medição da marca Mahr, modelo MarVision MM200 (Figura 19).

Figura 19: Microscópio de medição Mahr



Fonte: Autoria Própria

4.3.8 Rugosidade superficial

Para quantificar o valor de rugosidade superficial, foram utilizados os parâmetros R_a e R_t , para a caracterização da rugosidade média e total, respectivamente. O valor para comprimento de amostragem ou cut-off foi adotado com valor de 0,25 mm e o percurso da medição (l_m) foi adotado em 1,25mm.

A obtenção destas medições foram realizadas através de um rugosímetro da marca Mahr modelo Marsurf M300 (Figura 20). A ponta apalpadora deste dispositivo possui formato de um cone-esférico e tem o raio de ponta de cerca de 2 μm .

Figura 20: Rugosímetro marca Mahr modelo Marsurf M300



Fonte: Autoria Própria

Para cada ensaio, enquanto a fresa era ajustada, havia a realização das medições de rugosidade em três repetições, para que fosse possível gerar uma média das rugosidades média e total. As medições foram realizadas na peça dentro do centro de usinagem para que não houvesse a necessidade de retirar a peça do suporte em que estava fixada (Figura 21).

Figura 21: Medição da rugosidade sendo realizada



Fonte: Autoria Própria

4.3.9 Estudo dos cavacos

A cada conjunto de condições em que foi realizada uma passada, os cavacos obtidos foram guardados para que fosse possível sua análise.

Estes cavacos foram classificados segundo sua morfologia, como: Contínuos, descontínuos ou segmentados e com relação ao seu formato foram classificados em: fita, helicoidal, espiral ou lascas. Esta classificação está de acordo com as recomendações da norma ISO 3685:1993.

4.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Os dados obtidos no processo de fresamento, foram tratados utilizando a análise de variância ANOVA, através do software Minitab, versão 17.1.0. Este software também foi utilizado para realizar o teste de comparação múltipla de Tukey para realizar uma comparação entre as velocidades de corte, com a precisão de 95%.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para verificar se houve interação entre a posição assimétrica do corte e das variáveis de saída, foram analisadas cada uma dos parâmetros a seguir. O resultados, abaixo descritos, estão separados por pela posição da ferramenta, para que possa ser realizado um estudo comparativo.

Foi considerado, no tratamento dos resultados, que a condição de assimetria 1 é referente a largura de corte de $1/3D$ ou $a_p = 8,4$ mm, e que a condição de assimetria 2 possui largura de corte de $2/3D$ ou $a_p = 16,7$ mm.

5.1 AÇO SAE 4340 TEMPERADO E REVENIDO

Em todos os estudos realizados nessa pesquisa, foi utilizado o aço SAE 4340 temperado e revenido com dureza aproximada de 56 HRC.

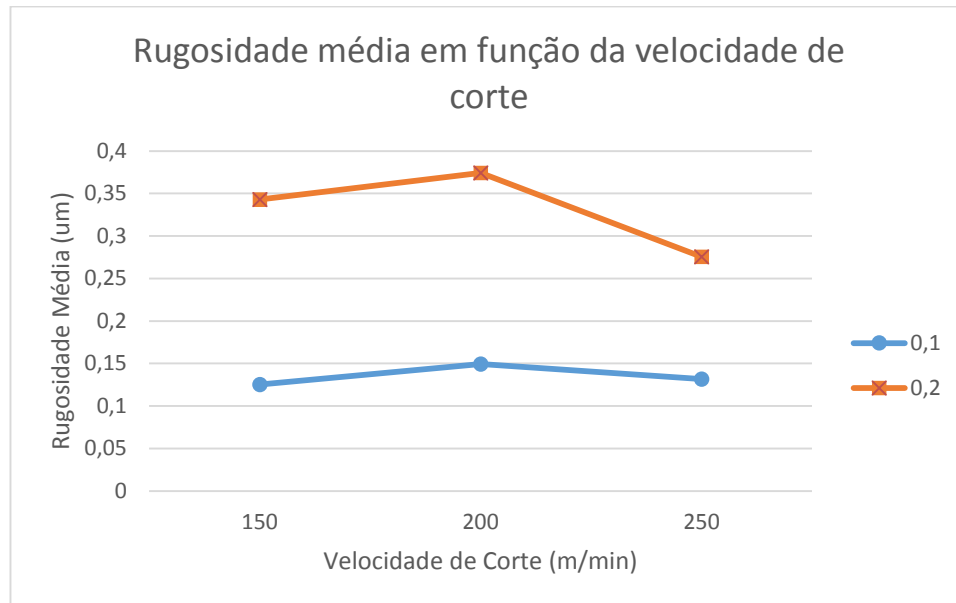
5.2 RUGOSIDADE MÉDIA (R_a)

5.2.1 Análise estatística

A interação entre os fatores de velocidade de corte e a rugosidade média, está apresentada no gráfico ilustrado pela Figura 22 e 23 para a condição de assimetria 1.

As análises levaram em conta os dois diferentes avanços por dente da fresa (f_z), levados em consideração para cada uma das condições analisadas abaixo:

Figura 22: Gráfico de interação entre a velocidade e a rugosidade – condição de assimetria 1



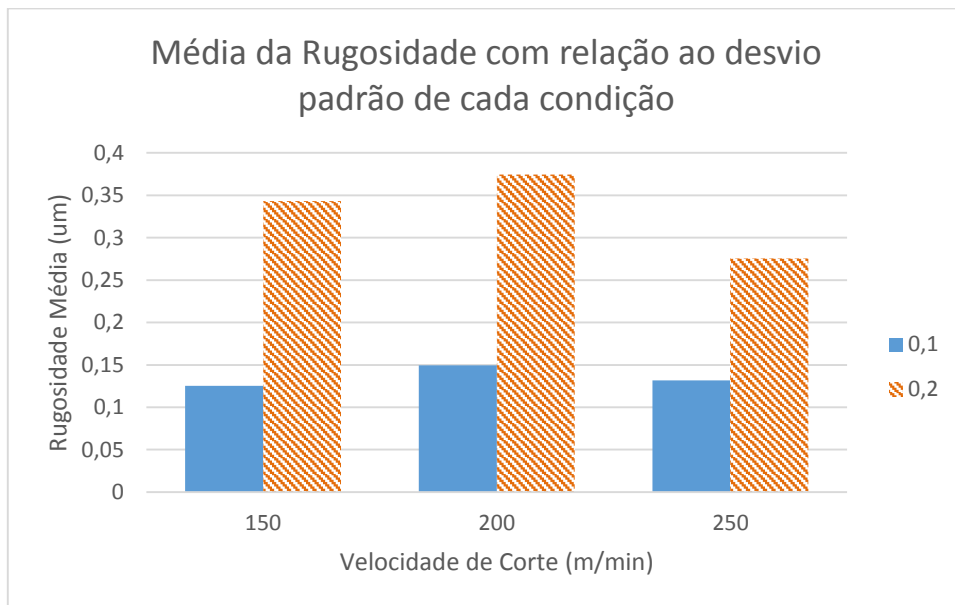
Fonte: Autoria Própria

Ao realizar a análise gráfica da primeira condição de assimetria, é possível perceber que os menores valores de rugosidade foram obtidos para velocidades de corte mais elevadas (250 m/min), chegando a 0,12 µm para o avanço de 0,1 mm/rot e com o valor de 0,27 µm para o 0,2 mm/rot de avanço por volta. Os resultados obtidos demonstram uma boa influência deste parâmetro no resultado global. Quando utilizado um maior avanço por dente os valores de rugosidade média se mostram mais elevados, chegando a 0,37 µm.

A melhor condição de rugosidade média para este caso de assimetria deu-se com a velocidade de corte 150 m/min e o avanço de 0,1 o que gerou uma rugosidade média de 0,12 µm.

A Figura 23 apresenta um gráfico de barras envolvendo a rugosidade obtida na usinagem do aço endurecido nas diferentes condições testadas. Para cada condição, acima de cada barra, está representado o desvio padrão para cada combinação de avanço e da respectiva velocidade de corte, para um intervalo de confiança de 95%.

Figura 23: Média da rugosidade com seu respectivo desvio padrão – condição de assimetria 1

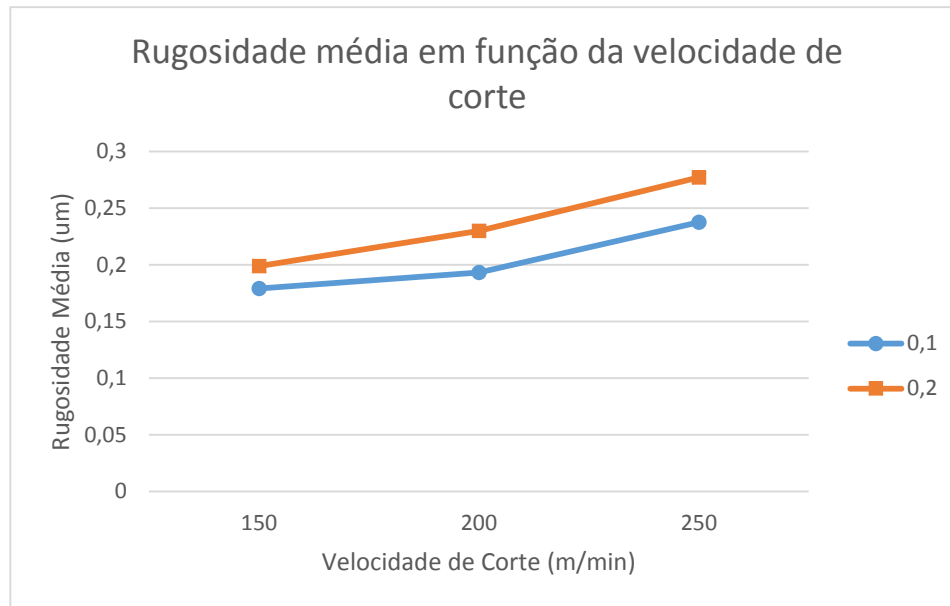


Fonte: Autoria Própria

Ao analisar os dados através desta figura é possível perceber a influência existente no aumento do avanço por dente, o que ocasiona uma maior rugosidade média e portanto um pior acabamento superficial.

Para a segunda condição de assimetria, com a largura de corte de $2/3D$, foi possível construir os gráficos abaixo, relacionando os parâmetros de rugosidade média, velocidade de corte e avanço (V_f), ilustrado pela Figura 24.

Figura 24: Gráfico de interação entre a velocidade e a rugosidade – condição de assimetria 2



Fonte: Autoria Própria

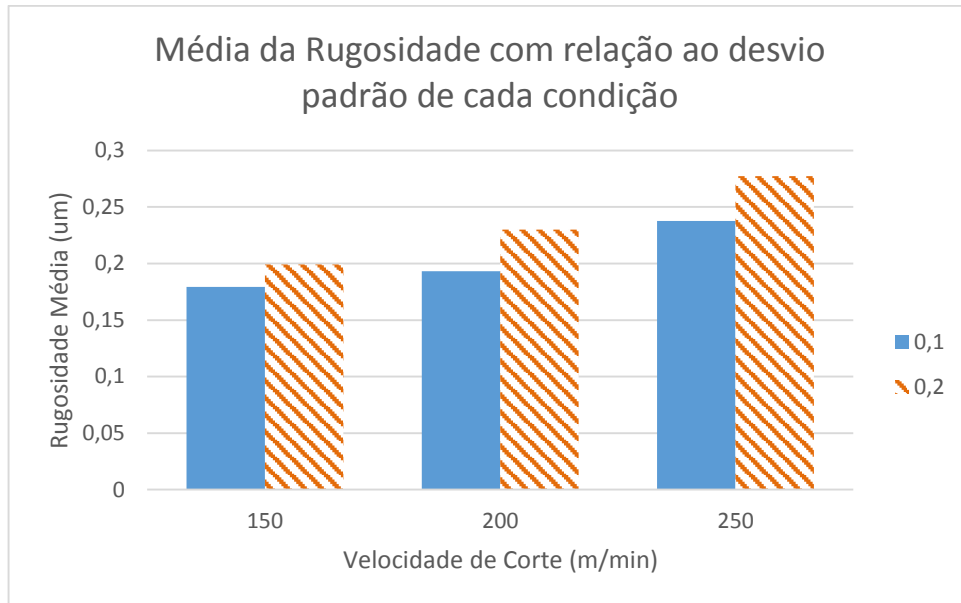
Para a segunda condição de assimetria, é possível perceber que os menores valores de rugosidade foram obtidos para as menores velocidades de corte (150 m/min), também é possível perceber que, para esta condição de assimetria, o valor da rugosidade é diretamente dependente da velocidade de corte utilizada, iniciando com valores de 0,17 µm e chegando até 0,23 µm – para o avanço de 0,1 dentes/volta.

Quando utilizado um maior avanço por dente os valores de rugosidade média se mostram mais elevados, alcançando o valor de 0,27 µm, porém esta variação é inferior ao observado na primeira condição de assimetria.

A melhor condição de rugosidade média para este caso de assimetria deu-se com a velocidade de corte 150 m/min e o avanço de 0,1 o que gerou uma rugosidade média de 0,17 µm, por outro lado, o pior resultado foi obtido para a velocidade de corte 250 m/min e avanço de 0,2 dentes/volta, que resultou um valor de rugosidade média de 0,27 µm.

A Figura 25 apresenta um gráfico de barras envolvendo a rugosidade obtida na usinagem do aço endurecido nas diferentes condições testadas. Para cada condição, acima de cada barra, está representado o desvio padrão para cada combinação de avanço e da respectiva velocidade de corte, para um intervalo de confiança de 95%.

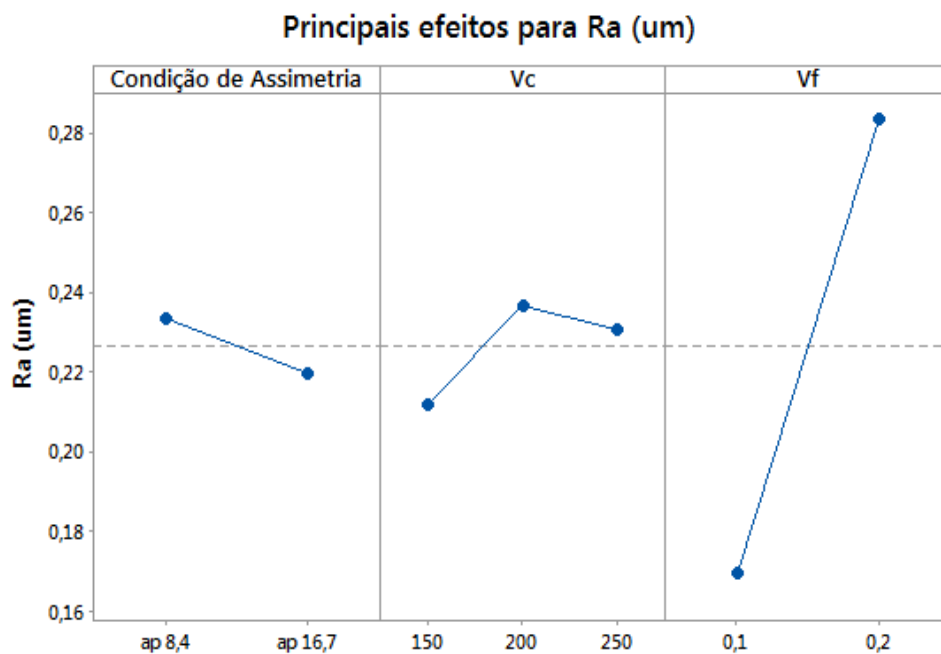
Figura 25: Média da rugosidade com seu respectivo desvio padrão – condição de assimetria 2



Fonte: Autoria Própria

Ao analisar os principais efeitos entre as variáveis de entrada para a rugosidade média R_a , é possível obter a Figura 26:

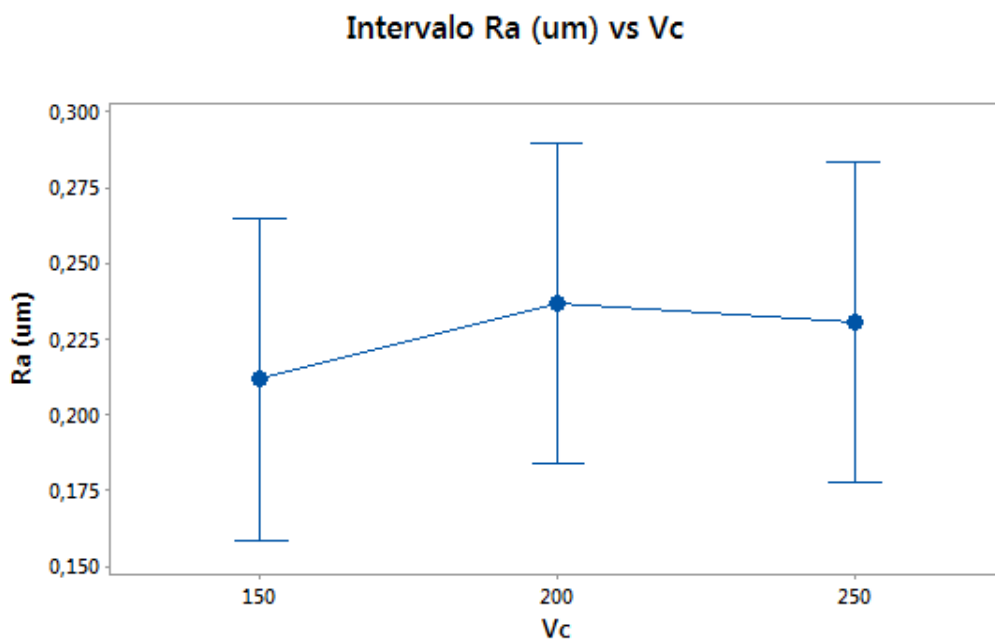
Figura 26: Principais efeitos entre as variáveis de entrada para a rugosidade média R_a



Fonte: Autoria Própria

Analisando os principais efeitos para a variação na rugosidade média é possível perceber que a maior influência ocorre na variação do avanço, não ocorrendo grandes variações quando analisada a posição de assimetria. Considerando a variação da velocidade de corte V_c , é possível perceber que ocorre uma interação quando consideramos a variação da velocidade para a rugosidade média, porém ao realizar o método de Tukey para avaliar esta variação é possível perceber que esta variação não é significativa utilizando um intervalo de confiança de 95%, conforme a Figura 27.

Figura 27: Método de Tukey para avaliação da variação da influência de V_c



Fonte: Autoria Própria

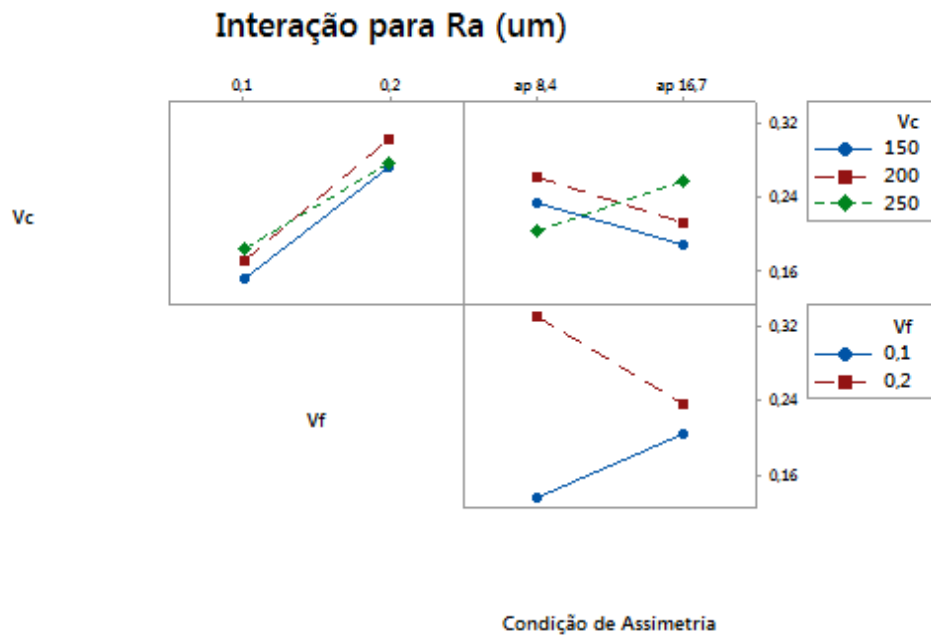
Ao analisar as interações de segunda ordem é possível perceber que ocorre uma variação significativa ao variar a condição de assimetria juntamente com a velocidade de corte ou a velocidade de avanço.

Para a interação de terceira ordem não houve nenhuma variação significativa.

A Figura 28, demonstra há um aumento na rugosidade quando altera-se a velocidade de corte juntamente com a velocidade de avanço. Ao variar a condição de assimetria juntamente com a velocidade de avanço é possível notar um aumento da rugosidade média para um menor valor de avanço – 0,1mm/volta, enquanto o oposto acontece quando levada em consideração a maior velocidade de avanço – 0,2 mm/volta.

Analisando a variação obtida com o aumento da velocidade de corte juntamente com a posição de assimetria é possível perceber uma redução na rugosidade média para as velocidades de corte mais baixas – quando se utiliza a segunda posição de assimetria, o oposto ocorre para uma maior velocidade de corte, onde a variação da posição de assimetria causa um aumento na rugosidade média R_a .

Figura 28: Gráfico de interação entre as variáveis de entrada e a saída R_a



Fonte: Autoria Própria

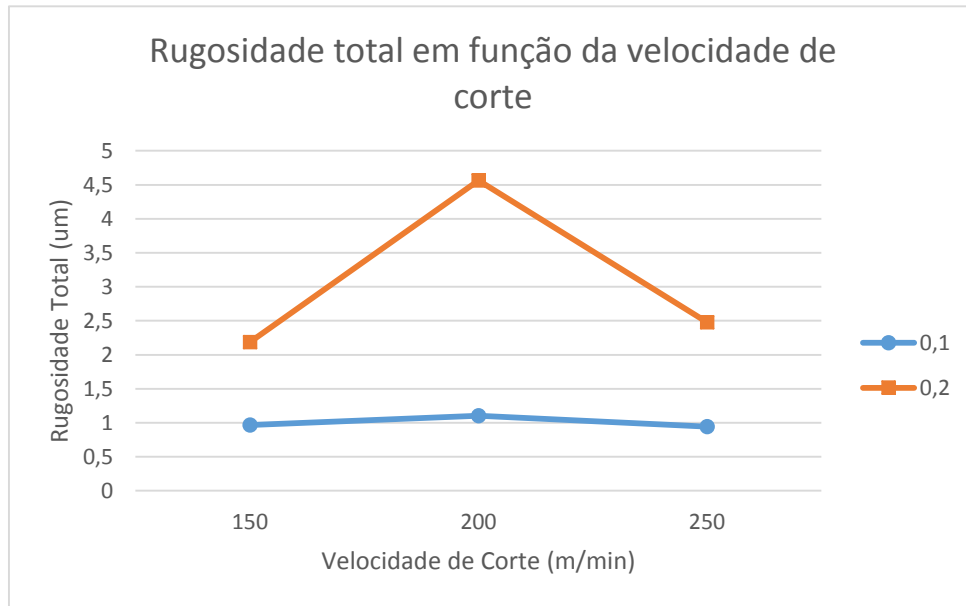
5.3 RUGOSIDADE TOTAL (R_t)

5.3.1 Análise estatística

Nas Figuras 29, 30, 31 e 32 estão demonstrados a influência dos parâmetros coletados na obtenção do valor de rugosidade total para as condições de assimetria analisadas. As análises levaram em consideração os dois diferentes avanços por dente da fresa (f_z), levados em consideração para cada uma das condições analisadas.

Na Figura 29, estão demonstradas as interação entre os fatores de velocidade de corte e a rugosidade total (R_t).

Figura 29: Rugosidade total em função da velocidade de corte – condição de assimetria 1



Fonte: Autoria Própria

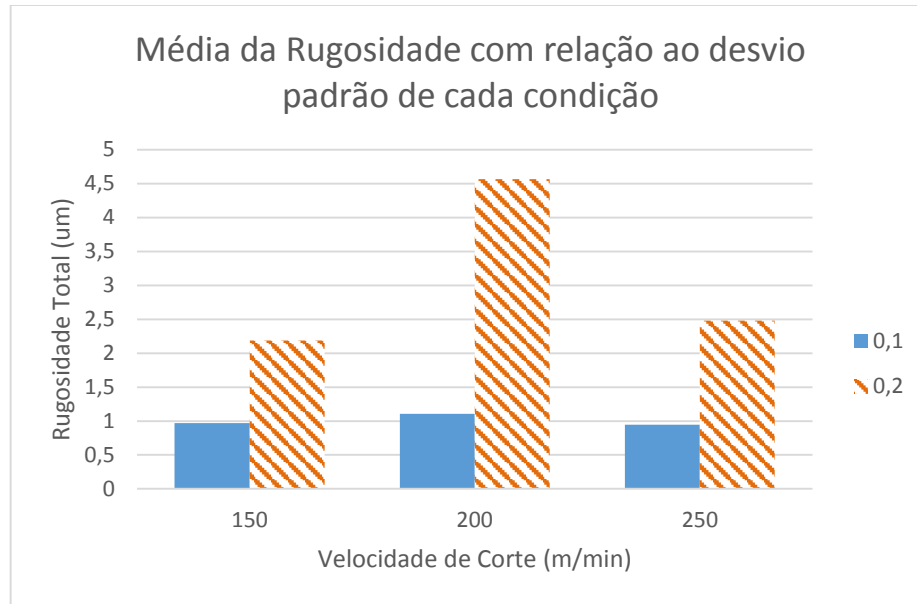
Ao analisar a rugosidade total para a primeira condição de assimetria é possível observar que para o valor de avanço de 0,1 dente/volta, a rugosidade possui o menor valor independentemente da velocidade de corte utilizada, e que para esta condição varia muito pouco com este parâmetro.

Quando analisa-se a condição de avanço de 0,2 dente/volta é possível notar uma pior qualidade superficial para a velocidade de 200 m/min o que ocasiona em maiores valores de rugosidade, chegando a 0,94 μm na condição de 250m/min e avanço de 0,1 dentes/volta.

O pior resultado, entretanto, é obtido para a condição de 200m/min como velocidade de corte e 0,2 dentes/volta de avanço.

A Figura 30, representa o desvio padrão para cada combinação de avanço e da respectiva velocidade de corte, para um intervalo de confiança de 95%.

Figura 30: Rugosidade total em função da velocidade de corte – condição de assimetria 1

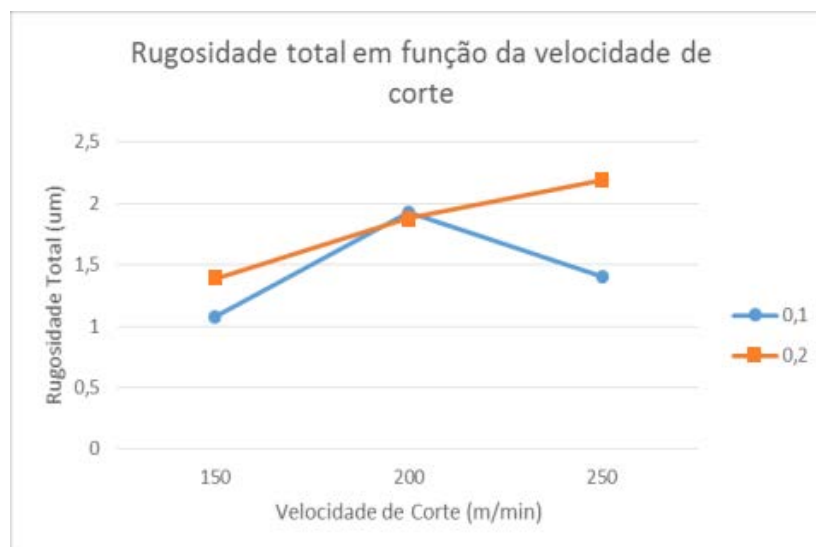


Fonte: Autoria Própria

É possível perceber que a média dos valores é mais baixa para um menor valor de avanço por dente da fresa.

Ao analisar-se os dados obtidos para segunda condição de simetria na Figura 31 é possível perceber que os valores de rugosidade tem um aumento conforme aumenta-se a velocidade para a condição de avanço 0,2, tendo seu menor valor 1,38µm e seu maior valor próximo a 2,19 µm.

Figura 31: Rugosidade total em função da velocidade de corte – condição de assimetria 2



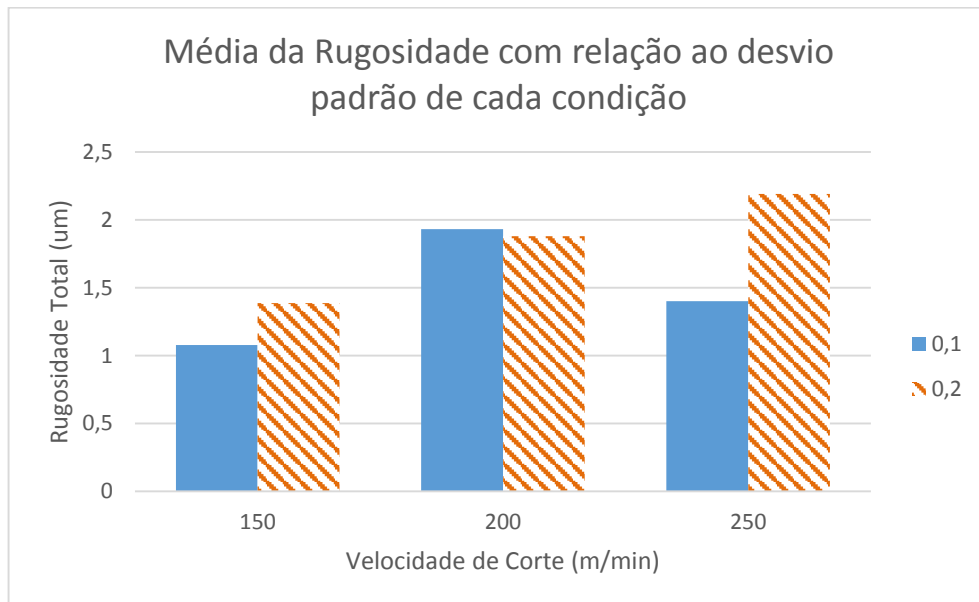
Fonte: Autoria Própria

Comparando esta informação com a rugosidade obtida para um avanço de 0,1 dentes/volta, é possível notar que há um aumento expressivo de rugosidade para a condição de velocidade 200 m/min, chegando próximo ao valor 1,93 μm , o maior valor registrado para essa condição.

Analisando esta variação para cada uma das condições analisadas, é possível construir o gráfico abaixo com os valores médios da rugosidade total e o seu respectivo desvio padrão.

A Figura 32, apresenta um gráfico de barras envolvendo a rugosidade obtida na usinagem do aço endurecido nas diferentes condições testadas. Para cada condição, acima de cada barra, está representado o desvio padrão para cada combinação de avanço e da respectiva velocidade de corte, para um intervalo de confiança de 95%.

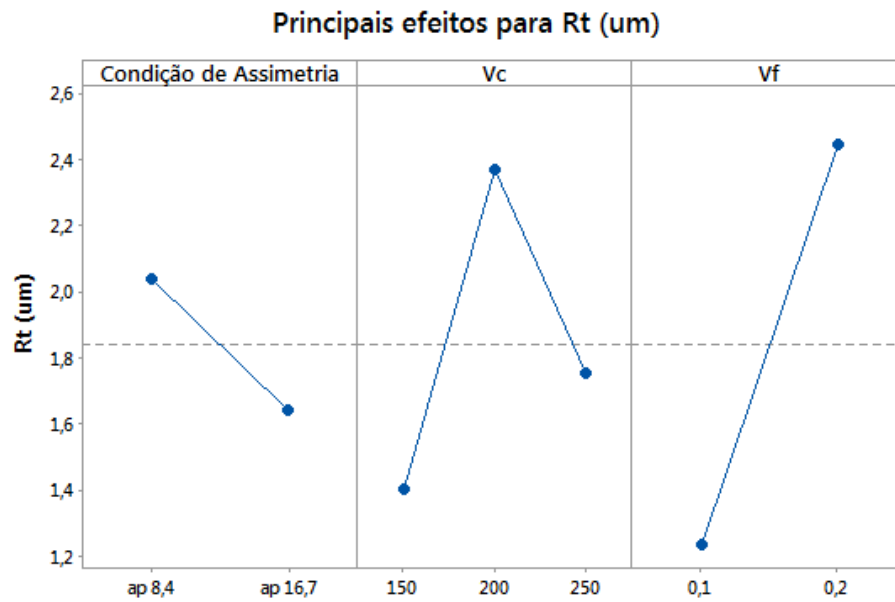
Figura 32: Rugosidade total em função da velocidade de corte – condição de assimetria 2



Fonte: Autoria Própria

Ao analisar os principais efeitos entre as variáveis de entrada para a rugosidade total R_t , é possível obter a Figura 33:

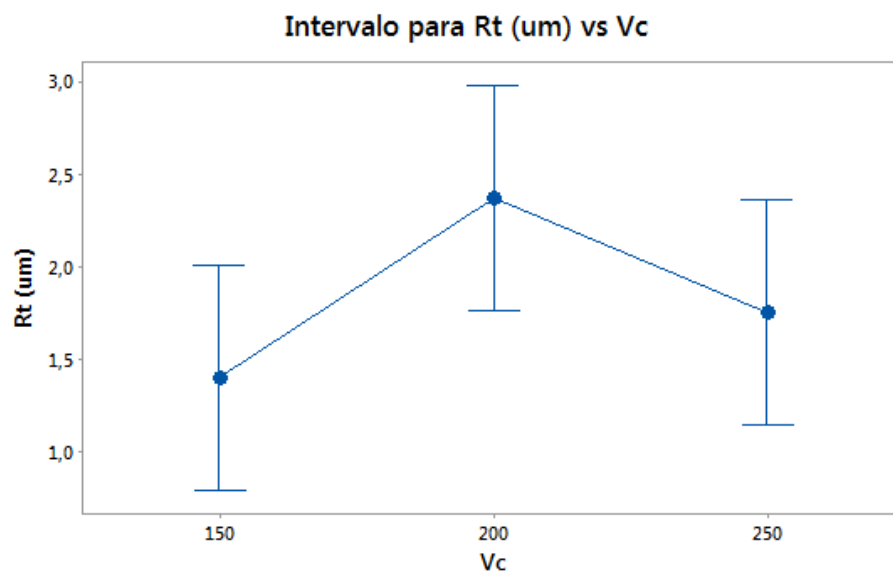
Figura 33: Principais efeitos entre as variáveis de entrada para a rugosidade total R_t



Fonte: Autoria Própria

Analisando o efeito ocasionado com a variação da condição de assimetria é possível notar que a variação não é tão significativa quanto a variação na velocidade de avanço, que é a causa principal da variação nos valores da rugosidade total R_t . Considerando a interação entre as velocidades de corte é possível notar, utilizando o método de Tukey, que esta variação não possui grande influência na análise da rugosidade total, conforme demonstrado pela Figura 34.

Figura 34: Método de Tukey para avaliação da variação da influência de V_c



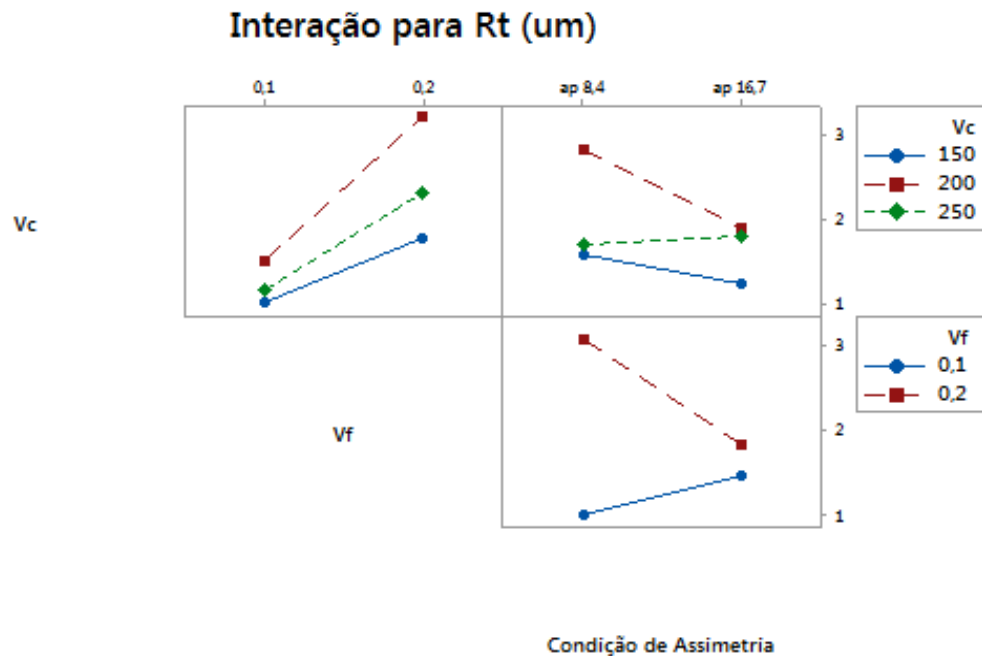
Fonte: Autoria Própria

Ao analisar as interações de segunda ordem é possível perceber que existe uma variação significativa para a saída quando analisa-se principalmente a interação entre a condição de assimetria e a velocidade de avanço V_f .

Para a interação de terceira ordem, onde varia-se simultaneamente as três variáveis de entrada, ocorre uma significativa alteração na saída, observada pela grande inclinação na linha que delimita esta influência.

A Figura 35, é resultado da interação entre as variáveis de entrada para obtenção da variável de saída R_t .

Figura 35: Gráfico de interação entre as variáveis de entrada e a saída R_t



Fonte: Autoria Própria

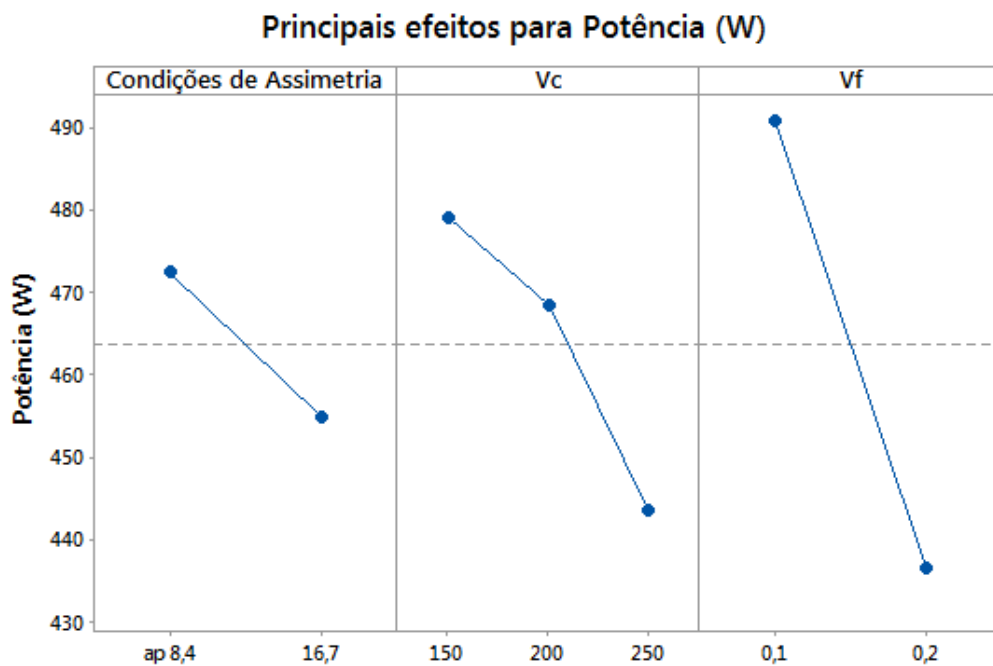
Ao analisar a variação causada pelas variações de V_c e V_f é possível notar um aumento na rugosidade total juntamente com o crescimento destas duas variáveis de entrada. Ao analisar a interação entre as velocidades de corte e a condição de assimetria é possível notar que a variação mais significativa ocorre quando a velocidade de corte V_c é de 200 m/min, causando uma redução na rugosidade total, quando utilizada a segunda condição de assimetria com $a_p = 16,7$ mm. Para as variações obtidas entre a velocidade de avanço V_f e e a condição de assimetria o valor da rugosidade aumenta na menor velocidade de avanço $V_f = 0,1$ mm/volta e tem uma redução mais significativa quando analisado a maior velocidade de avanço $V_f = 0,2$ mm/volta.

5.4 POTÊNCIA CONSUMIDA

5.4.1 Análise de Variância

A Figura 36 demonstra os principais efeitos para a variação da potência, variando as condições de assimetria, velocidade de corte e velocidade de avanço.

Figura 36: Principais efeitos entre as variáveis de entrada para a potência

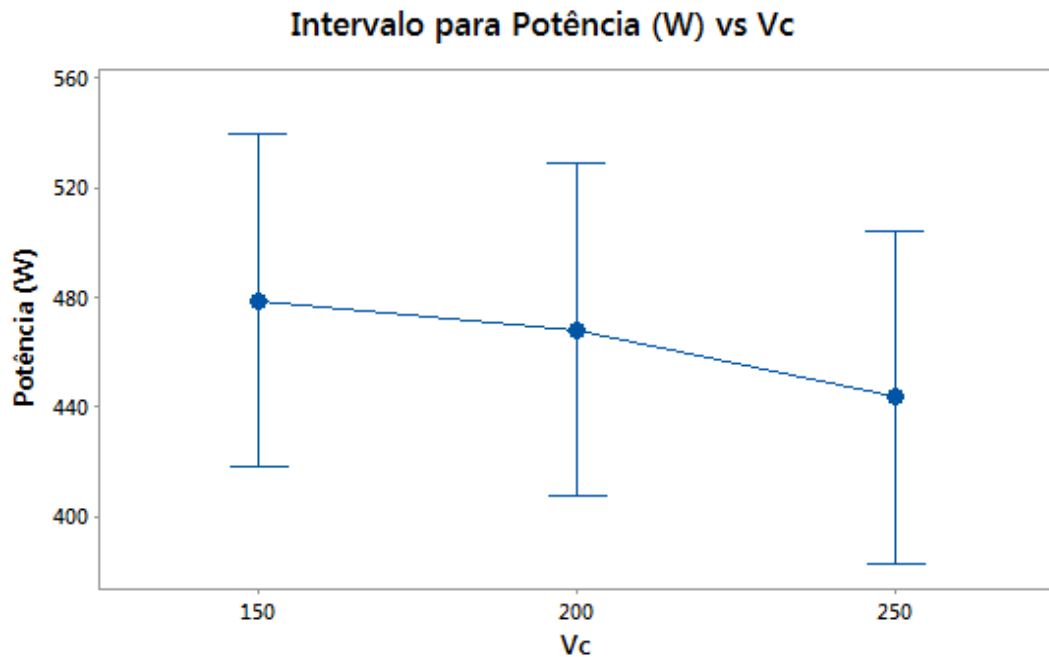


Fonte: Autoria Própria

Analisando o gráfico com os principais efeitos na variação da potência é possível perceber que utilizando a condição de assimetria de $a_p = 16,7$ mm o valor obtido de potência é reduzido, porém a variação da condição de assimetria é menos influente para a potência do que quando analisado a variação da velocidade de avanço. Para a condição na qual o avanço utilizado foi maior, é possível notar uma redução brusca na potência consumida, sendo este o fator de maior impacto no resultado final.

É possível notar que esta mesma característica, de redução de potência, também ocorre quando analisa-se a variação na velocidade de corte, porém, para explorar mais este cenário é necessário realizar uma análise, utilizando o método de Tukey, para avaliar o quão impactante é esta variação de velocidade (Figura 37).

Figura 37: Método de Tukey para avaliação da influência de V_c



Fonte: Autoria Própria

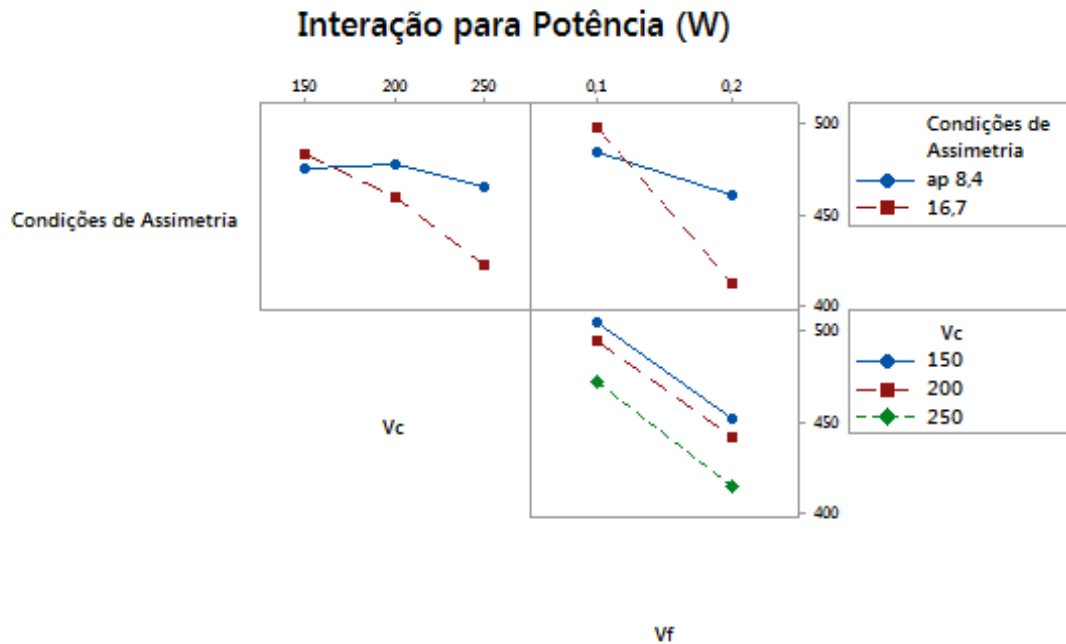
O método de Tukey é capaz de mostrar como a variação da velocidade de corte influencia no resultado da potência, neste caso é possível perceber que um aumento em V_c , ocasiona uma redução na potência consumida.

Ao analisar as interações de segunda ordem é possível perceber que existe uma variação significativa para a saída quando analisa-se principalmente a interação entre a condição de assimetria e a velocidade de avanço V_f .

Para a interação de terceira ordem, onde varia-se simultaneamente as três variáveis de entrada, não ocorre nenhuma variação significativa.

A Figura 38, é resultado da interação entre as variáveis de entrada para obtenção da variável de saída potência – P (W).

Figura 38: Gráfico de interação entre as variáveis de entrada e a saída potência - P (W)



Fonte: Autoria Própria

Analisando a relação da interação entre a condição de assimetria e a velocidade de corte é possível perceber uma redução de potência para um aumento de velocidade e que o maior valor de profundidade de corte ($a_p = 16,7$ mm) gera menores valores de potência.

Quando é analisada a interação entre a velocidade de corte V_c e a velocidade de avanço V_f , é possível notar que para os maiores valores de avanço a potência é reduzida e que o aumento da velocidade também causa a redução da potência.

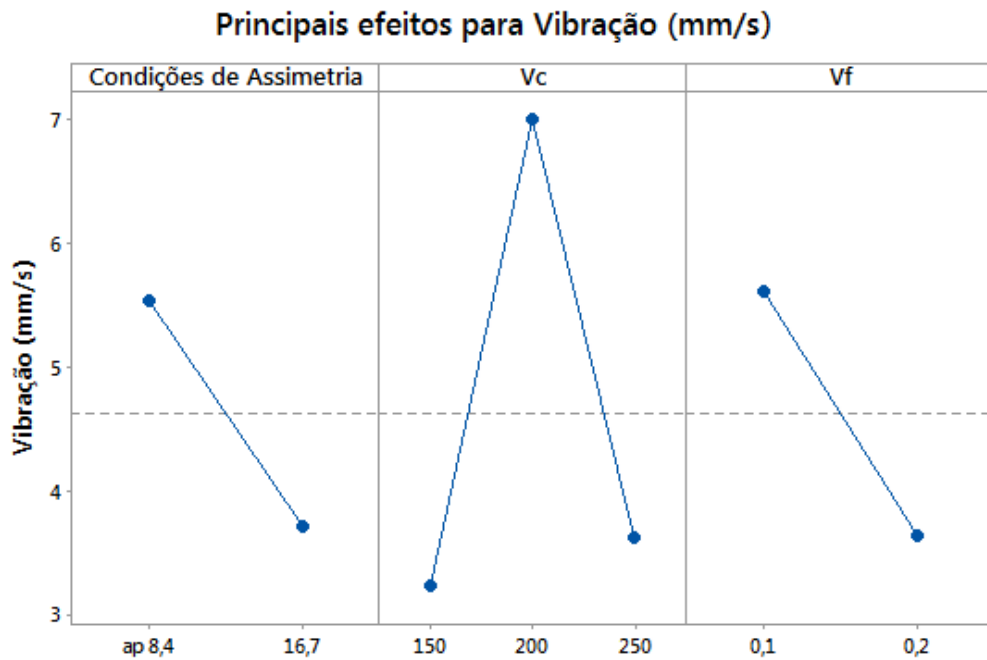
Já a condição de assimetria, quando analisada juntamente com a velocidade de avanço, demonstra uma redução de potência mais expressiva para uma maior profundidade de corte a_p .

5.5 VIBRAÇÃO

Para analisar os dados obtidos com a variação da vibração, foi utilizada uma análise de variância, que será descrita a seguir.

A Figura 39 demonstra os principais efeitos para a variação da vibração, variando as condições de assimetria, velocidade de corte e velocidade de avanço.

Figura 39: Principais efeitos entre as variáveis de entrada para a vibração

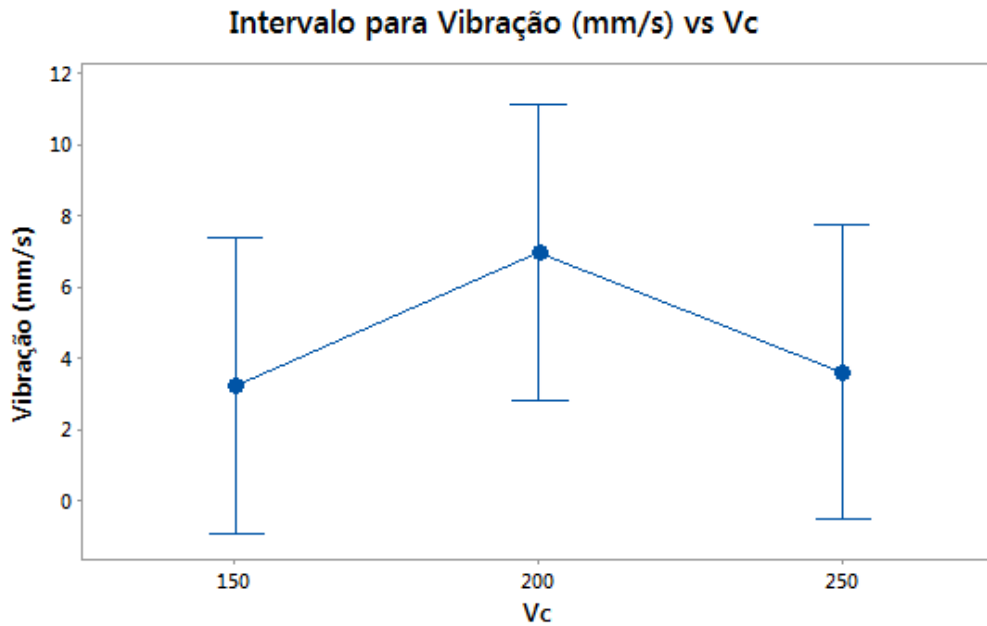


Fonte: Autoria Própria

A partir da figura a cima é possível perceber que com a segunda condição de assimetria ($a_p = 16,6\text{mm}$) o valor da vibração é reduzido e que este mesmo padrão se repete para a variação do avanço, portanto para uma maior velocidade de avanço o valor da vibração é reduzido. Ao observar os dados obtidos com a variação da velocidade de corte é possível notar um crescimento com a velocidade próxima a 200 m/s, porém ao aumentar a velocidade de corte ($V_c = 250\text{ m/s}$) este valor é reduzido para valores próximos ao obtido com a menor velocidade de corte.

Para entender mais a influência da velocidade na variação da vibração é necessário verificar o quanto ela interfere neste resultado, por isso, realizou-se o método de Tukey mostrado abaixo pela Figura 40.

Figura 40: Método de Tukey para avaliação da influência de V_c



Fonte: Autoria Própria

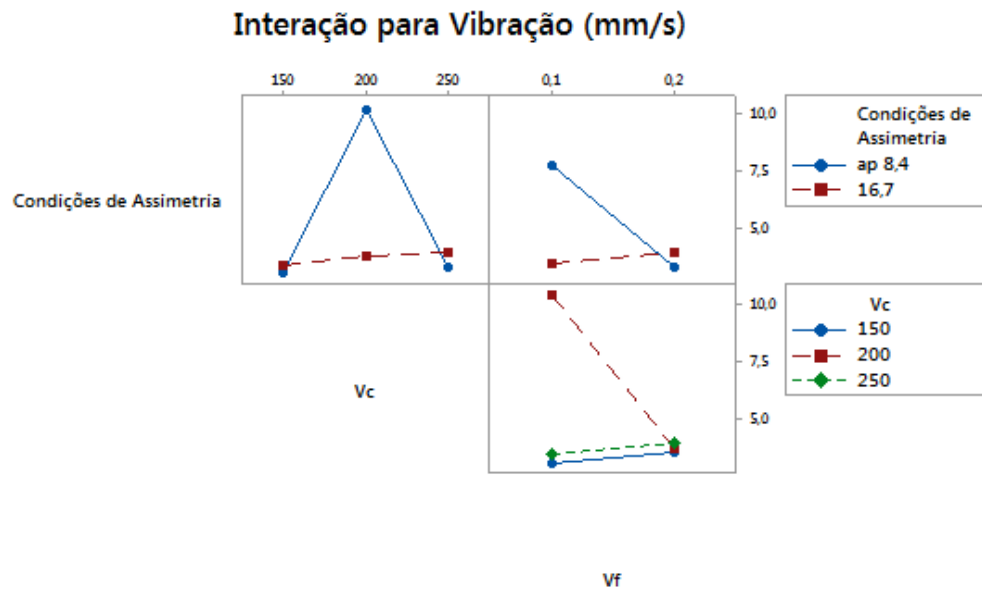
O método de Tukey é capaz de mostrar como a variação da velocidade de corte influencia no resultado da vibração, porém os resultados não foram expressivos ao se analisar, com um intervalo de 95% de confiança.

Para as interações de segunda ordem, onde se analisa a variação conjunta de duas variáveis de entrada, é possível perceber que não existe nenhuma variação significativa para a saída.

Para a interação de terceira ordem, onde varia-se simultaneamente as três variáveis de entrada, não ocorre nenhuma variação significativa.

A Figura 41, é resultado da interação entre as variáveis de entrada para obtenção da variável de saída vibração mm/s.

Figura 41: Gráfico de interação entre as variáveis de entrada e a saída potência - P (W)



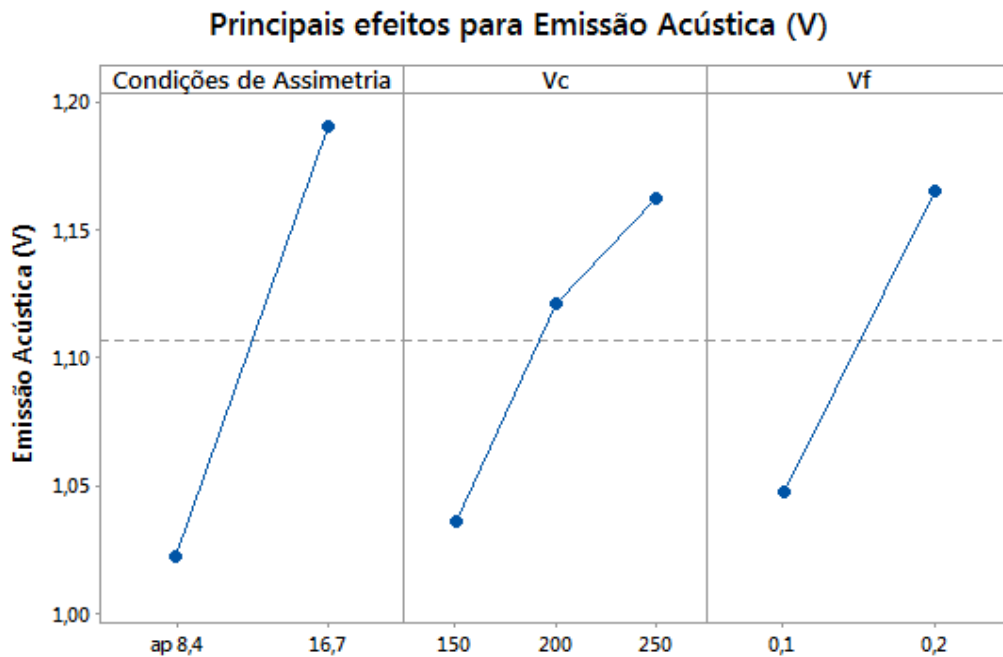
Fonte: Autoria Própria

A figura acima, demonstra a interação entre as variáveis de entrada e a resposta medida para a análise da vibração. A velocidade de corte quando analisada juntamente com a condição de assimetria demonstra que para um maior valor de a_p , a vibração apresenta um crescimento constante, porém na condição de assimetria com menor valor de a_p , ocorre um expressivo aumento para a velocidade de 200 m/s, que tende-se a reduzir com o aumento da velocidade. A mesma ideia surge ao analisar a relação entre V_c e V_f , já que para o menor valor de a_p , juntamente com a velocidade de 200 m/s, apresenta uma maior vibração.

5.6 EMISSÃO ACÚSTICA

A Figura 42 demonstra os principais efeitos para a variação da emissão acústica, variando as condições de assimetria, velocidade de corte e velocidade de avanço.

Figura 42: Principais efeitos entre as variáveis de entrada para a emissão acústica



Fonte: Autoria Própria

Analisando a figura acima é possível perceber que a variação na condição de assimetria causa um aumento significativo na variável de saída, a mesma condição ocorre na variação da velocidade de avanço V_f .

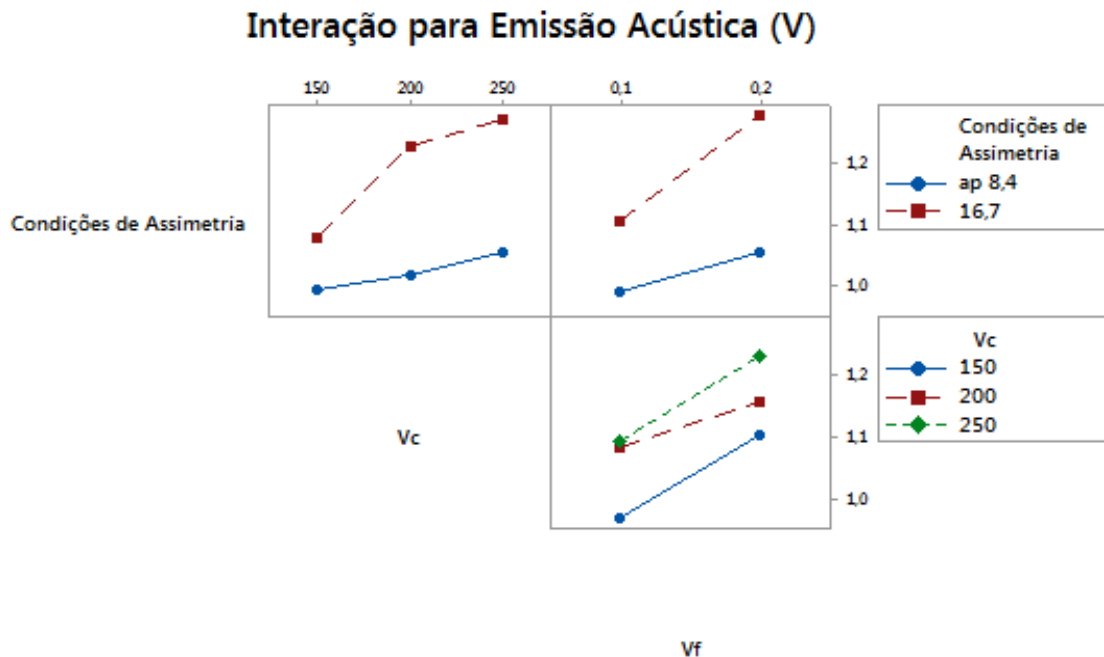
Observando a variação na velocidade de corte V_c , é possível perceber que ocorre um aumento na emissão sonora, porém esta variação comparada as duas variações analisadas anteriormente é pouco significativa.

Para as interações de segunda ordem, onde se analisa a variação conjunta de duas variáveis de entrada, é possível perceber que quando esta interação possui a variável de condição de assimetria o resultado é significativo, comprovando mais uma vez a forte dependência desta variável de entrada no resultado final.

Para a interação de terceira ordem, onde varia-se simultaneamente as três variáveis de entrada, não ocorre nenhuma variação significativa.

A Figura 43, é resultado da interação entre as variáveis de entrada para obtenção da variável de saída emissão acústica (V).

Figura 43: Gráfico de interação entre as variáveis de entrada e a saída emissão acústica (V)



Fonte: Autoria Própria

A figura acima, demonstra a interação entre as variáveis de entrada e a resposta medida para a análise da emissão acústica.

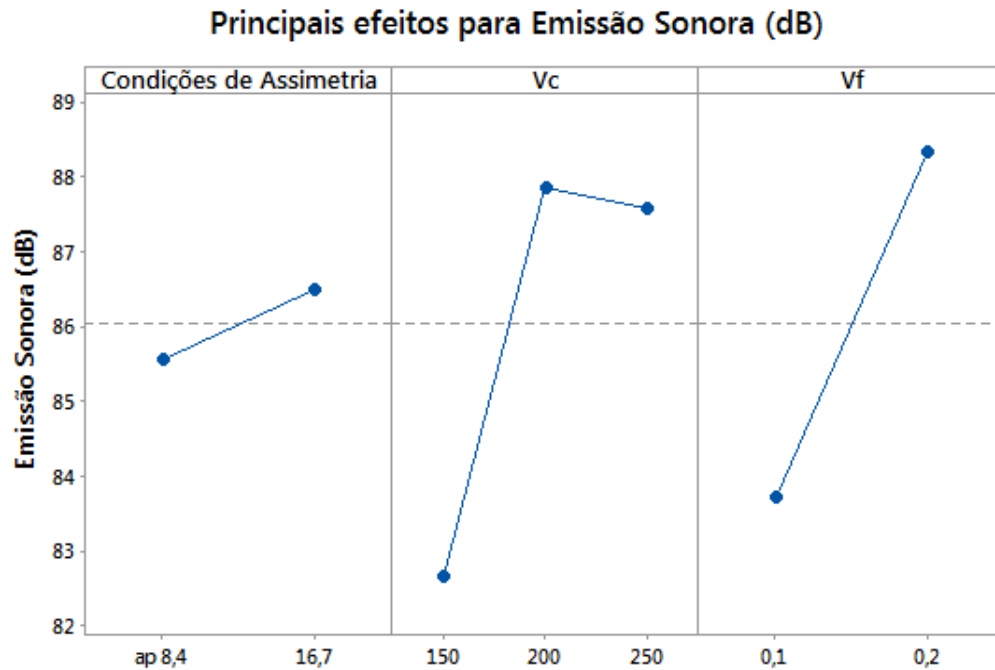
Analisando conjuntamente a variação da condição de assimetria e da velocidade de corte é possível perceber que para um menor $a_p = 8,4\text{mm}$ a variação da velocidade de corte V_c , não interfere tanto para a saída de emissão acústica, porém a saída é intensificada para a condição em que há um maior $a_p = 16,7\text{mm}$. Quando analisado conjuntamente os parâmetros V_c e V_f é possível notar um aumento da saída emissão para maiores valores de V_c e V_f . O mesmo ocorre para a análise conjunta de V_f e condição de assimetria, porém o aumento da emissão acústica para um maior valor de a_p é mais sensível.

5.7 EMISSÃO SONORA

Para analisar os dados obtidos com a variação da emissão sonora, foi utilizada uma análise de variância, que será descrita a seguir.

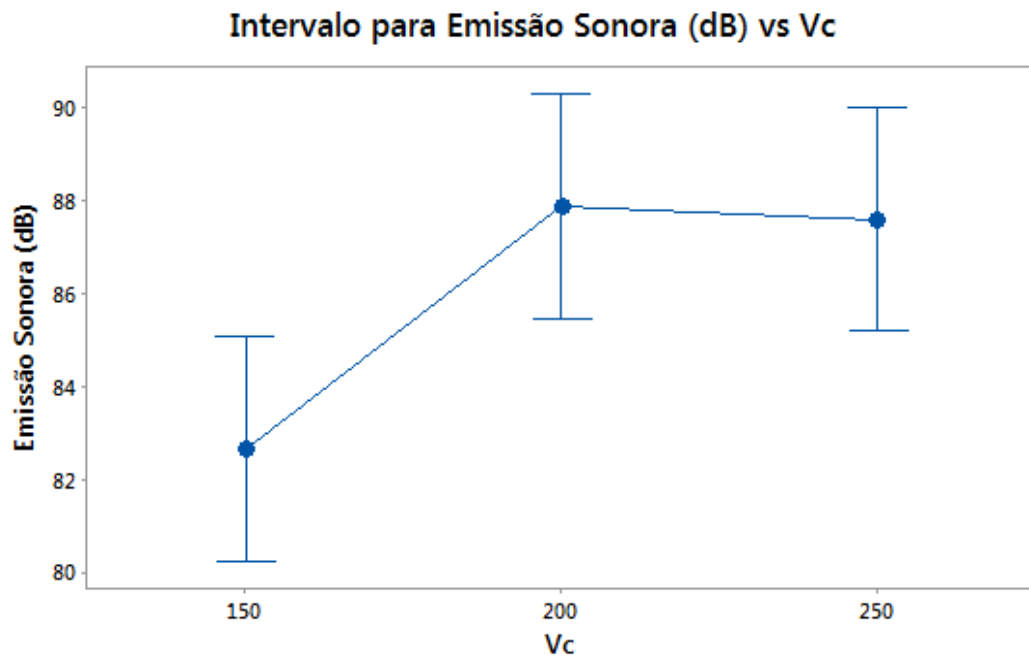
A Figura 44 demonstra os principais efeitos para a variação da emissão sonora, variando as condições de assimetria, velocidade de corte e velocidade de avanço.

Figura 44: Principais efeitos entre as variáveis de entrada para a vibração



Fonte: Autoria Própria

A variação da condição de assimetria é pouco impactante para a variação da emissão sonora, é possível perceber pelo gráfico acima esta baixa variação porém é possível perceber a grande sensibilidade que a variável de saída possui quando analisa-se a variação causada pela variação na emissão sonora. Esse aumento expressivo também ocorre com relação a variação da velocidade de corte porém para visualizar melhor o ocorrido com a velocidade de corte é necessário verificar o quanto ela interfere neste resultado, por isso, realizou-se o método de Tukey mostrado abaixo pela Figura 45.

Figura 45: Método de Tukey para avaliação da influência de V_c 

Fonte: Autoria Própria

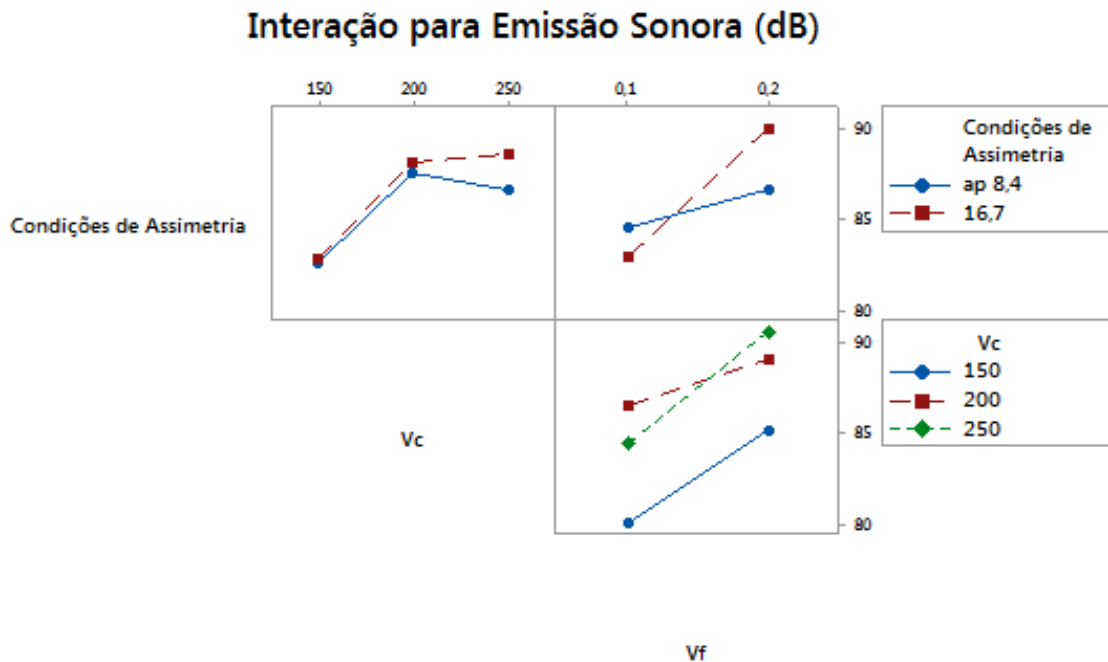
O método de Tukey é capaz de mostrar como a variação da velocidade de corte influencia no resultado da emissão sonora. É possível perceber que a emissão é menor para uma menor velocidade de corte, porém ao aumentar essa velocidade ($V_c = 200$ m/s) o aumento da emissão sonora é significativo e se mantém em um valor alto (Emissão Sonora = 87dB) quando analisamos a velocidade de corte mais alta utilizada ($V_c = 250$ m/s).

Para as interações de segunda ordem, onde se analisa a variação conjunta de duas variáveis de entrada, todas as interações envolvendo a condição de assimetria e a velocidade de avanço são muito significativas, o que já era esperado devido sua grande influência demonstrada nos gráficos anteriores.

Para a interação de terceira ordem, onde varia-se simultaneamente as três variáveis de entrada, o resultado também é muito significativo.

A Figura 46, é resultado da interação entre as variáveis de entrada para obtenção da variável de saída vibração mm/s.

Figura 46: Gráfico de interação entre as variáveis de entrada e a saída emissão sonora (dB)



Fonte: Autoria Própria

A figura acima, demonstra a interação entre as variáveis de entrada e a resposta medida para a análise da emissão sonora. A variação da velocidade de corte, quando analisada conjuntamente com a variação da condição de assimetria, gera o mesmo perfil dos dados, porém atinge maiores valores para a condição de assimetria com maior a_p . Quando compara-se os dados obtidos com as relação entre V_c e V_f é possível perceber que os maiores valores de emissão ocorrem para os maiores valores de velocidade de avanço $V_f = 0,2$ mm/volta.

O mesmo ocorre para a relação entre a condição de assimetria e a velocidade de avanço, onde os maiores valores de V_f , causam maiores valores de emissão, porém para o menor valor de V_f , a condição de assimetria com maior valor de $a_p = 16,7$ mm, gera um menor valor de emissão sonora.

5.8 DESGASTE DA FERRAMENTA

5.8.1 Desgaste da Ferramenta em função do comprimento usinado

O desgaste foi medido e está apresentado abaixo (Tabela 7):

Tabela 6: Desgaste medido por ferramenta utilizada

Ensaio	Ferramentas			Média
	1	2	3	
1	0,022	0,845	0,069	0,312
2	0,036	0,075	0,046	0,052
3	0,055	0,038	0,048	0,047
4	0,049	0,031	0,049	0,043
5	0,041	0,037	0,056	0,045
6	0,034	0,046	0,047	0,042
7	0,156	0,047	0,079	0,094
8	0,048	0,054	0,054	0,052
9	0,595	0,536	0,684	0,605
10	0,068	0,070	0,053	0,064
11	0,054	0,097	0,071	0,074
12	0,969	0,869	0,984	0,941

Fonte: Autoria Própria

As medições acima foram obtidas por intermédio da utilização do microscópio para a medição do desgaste de flanco. Ao realizar o cálculo do comprimento de corte usinado em cada uma das condições e compará-lo ao desgaste médio medido, é possível construir a Tabela 8, abaixo:

Tabela 7: Desgaste medido em relação ao comprimento de corte usinado

Ensaio	L_c [m]	V_b [mm]	V_b/L_c
1	15,46	0,312	2,018E-05
2	7,73	0,052333	6,770E-06
3	15,46	0,047	3,040E-06
4	7,73	0,043	5,563E-06
5	15,46	0,044667	2,889E-06
6	7,73	0,042333	5,476E-06
7	23,92	0,094	3,930E-06
8	11,96	0,052	4,348E-06
9	23,92	0,605	2,529E-05
10	11,96	0,063667	5,323E-06
11	23,92	0,074	3,094E-06
12	11,96	0,940667	7,865E-05

Fonte: Autoria Própria

Como cada relação de parâmetros de usinagem resulta em um determinado valor de comprimento de corte é necessário realizar a divisão V_b/L_c para termos a sensibilidade do desgaste de cada pastilha em relação o quanto a mesma usinou.

Da tabela acima é possível concluir que os melhores desgastes foram obtidos para os ensaios 5 e 3 – para a menor profundidade de usinagem ($a_p = 8,4$ mm). Já para a maior profundidade de corte, a melhor relação de V_b/L_c foi obtida pelos ensaios 11 e 7 respectivamente.

Já os piores valores de V_b/L_c , ocorreram para os ensaios 12 e 9 – para a maior condição de profundidade de usinagem ($a_p = 16,7$ mm). Já para a condição com menor profundidade de usinagem os piores valores foram obtidos nos ensaios 1 e 2 respectivamente.

Ao realizar a medição dos desgastes obtidos foi possível observar que algumas ferramentas apresentavam, além do desgaste, alguma avaria e por isso a Tabela 9, trás uma relação das avarias em cada um dos ensaios.

Tabela 8: Tabela de relação de avarias por pastilha em cada ensaio

Ensaio	Ferramentas		
	1	2	3
1		Quebra	
7			Lascamento
9	Quebra	Lascamento	Quebra
12	Quebra	Quebra	

Fonte: Autoria Própria

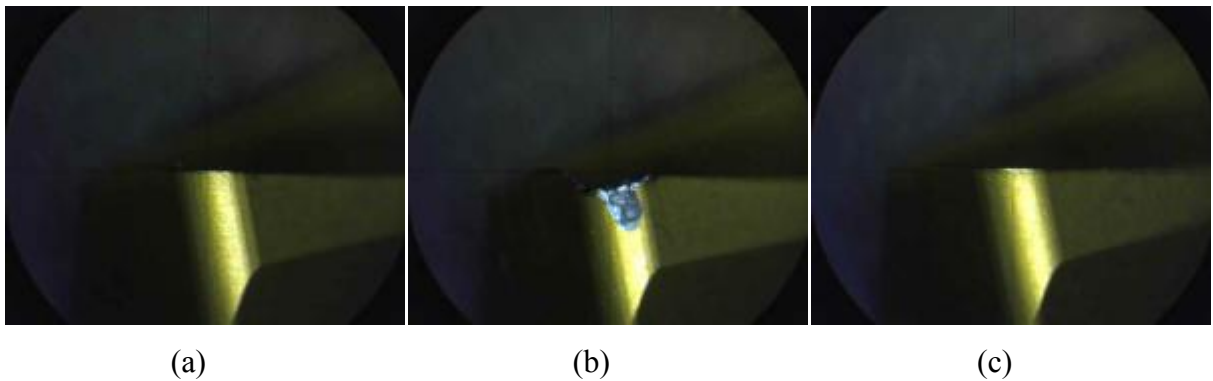
Com esta tabela é possível perceber que houve um maior número de quebras em detrimento de qualquer outro tipo de avaria, também pode-se perceber que a maior parte das quebras ocorreram para as condições com o maior valor de profundidade de corte ($a_p = 16,7$ mm).

Relacionando os dados obtidos nas duas últimas tabelas é possível perceber que os piores valores de V_b/L_c ocorreram justamente para as condições em que houveram avarias na maior parte das ferramentas.

5.8.2 Análise Qualitativa

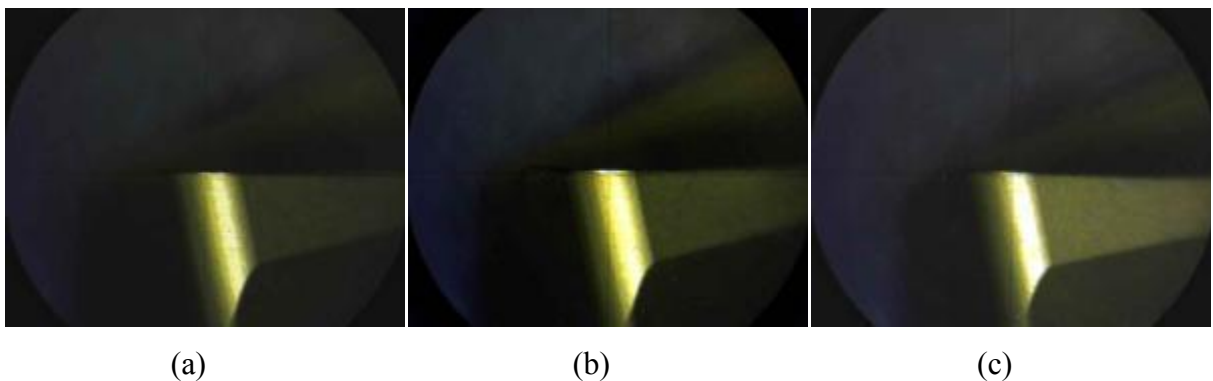
As Figuras 47, 48, 49 e 50 mostram as pastilhas para as piores condições de usinagem obtidas.

Figura 47: Desgaste das ferramentas utilizadas para o fresamento frontal - Ensaio 1, com as seguintes condições ($V_c = 150$ m/min; $V_f = 0,1$ mm/volta; $a_p = 8,4$ mm)



Fonte: Autoria Própria

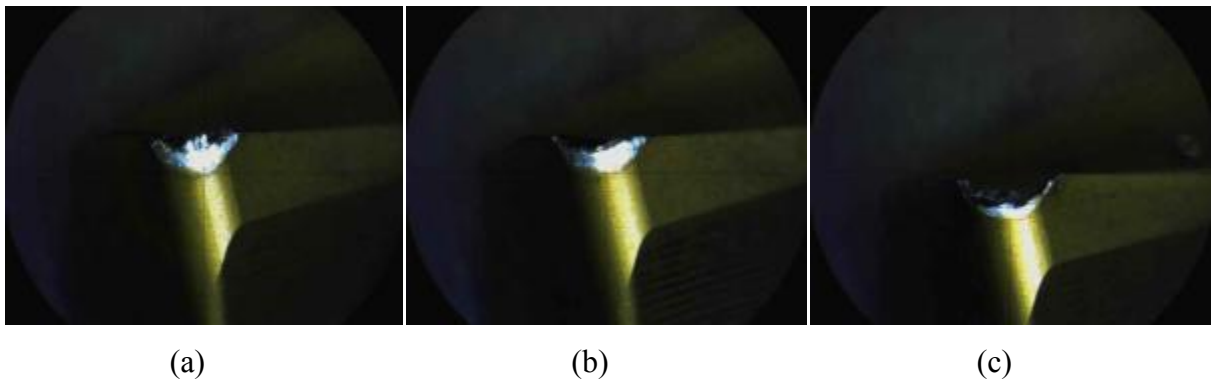
Figura 48: Desgaste das ferramentas utilizadas para o fresamento frontal - Ensaio 2, com as seguintes condições ($V_c = 150$ m/min; $V_f = 0,2$ mm/volta; $a_p = 8,4$ mm)



Fonte: Autoria Própria

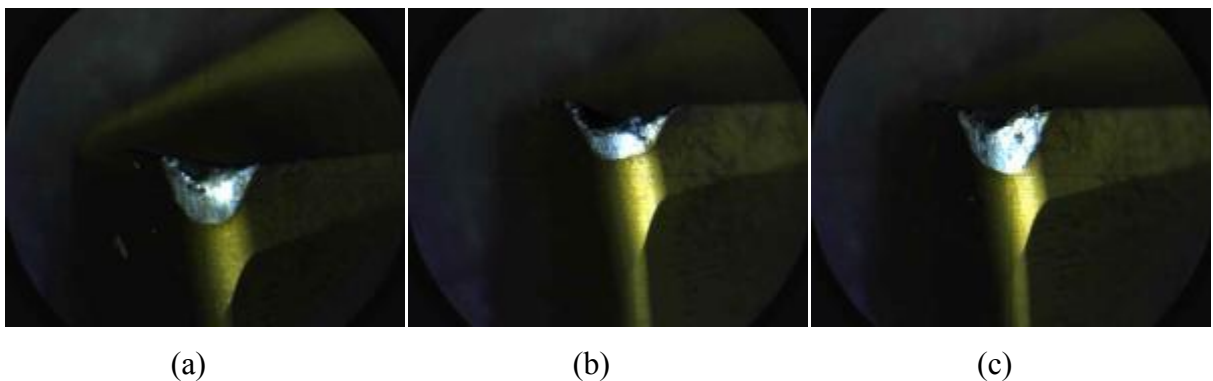
As Figuras 47 e 48 acima, mostram o desgaste sofrido pelas três pastilhas em cada uma das condições descritas. As duas figuras mostram os desgastes nas pastilhas para as piores condições obtidas para a condição de assimetria 1, com $a_p = 8,4$ mm. Na Figura 48 (b) é possível perceber o lascamento sofrido pela ferramenta 2.

Figura 49: Desgaste das ferramentas utilizadas para o fresamento frontal - Ensaio 9, com as seguintes condições ($V_c = 200$ m/min; $V_f = 0,1$ mm/volta; $a_p = 16,7$ mm)



Fonte: Autoria Própria

Figura 50: Desgaste das ferramentas utilizadas para o fresamento frontal - Ensaio 12, com as seguintes condições ($V_c = 250$ m/min; $V_f = 0,2$ mm/volta; $a_p = 16,7$ mm)



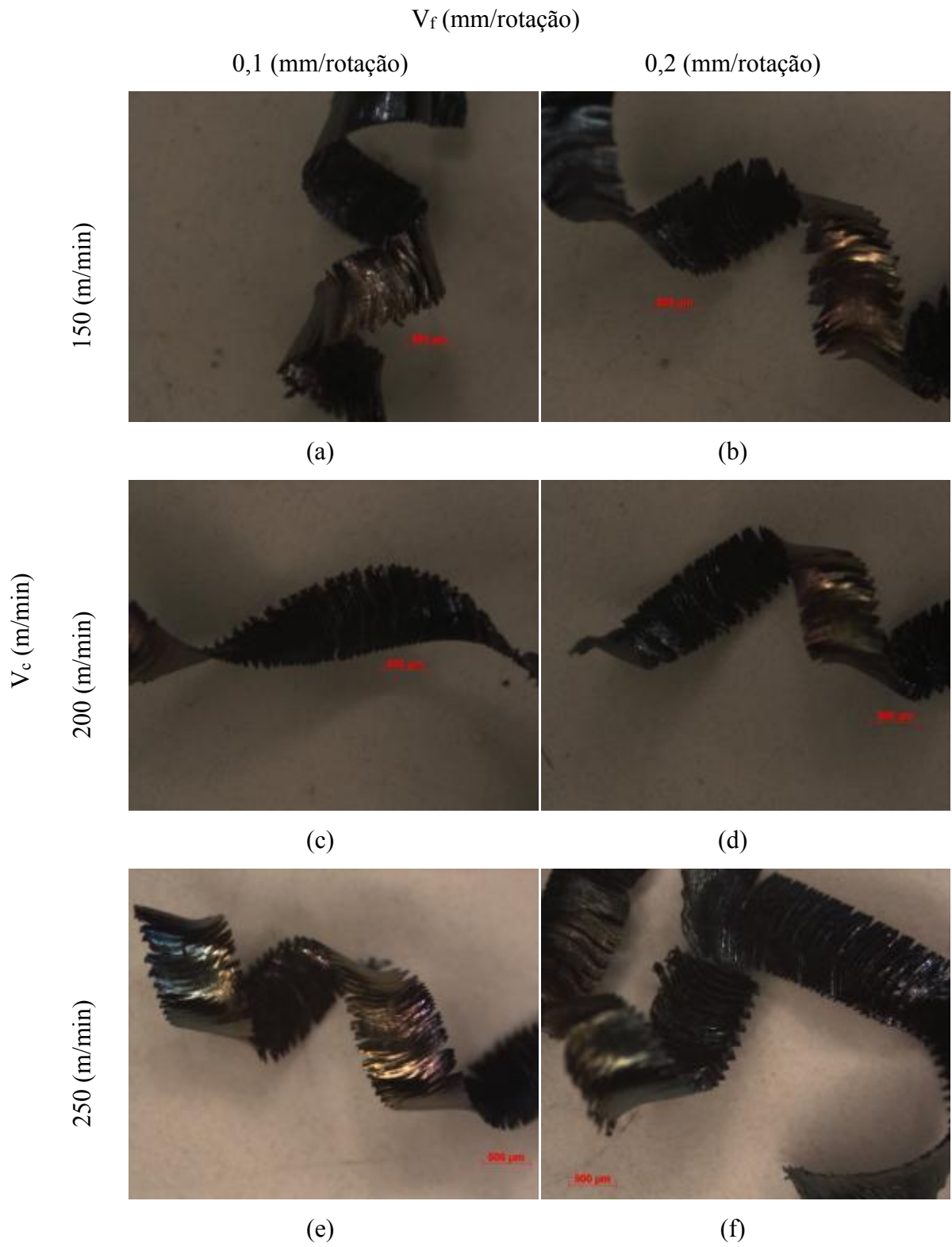
Fonte: Autoria Própria

As figuras 49 e 50, mostram o desgaste e avarias para a condição de assimetria com a maior profundidade de corte ($a_p = 16,7$ mm). É possível perceber que em todas as fotos, houve uma quebra ou lascamento, que foram as avarias mais evidentes.

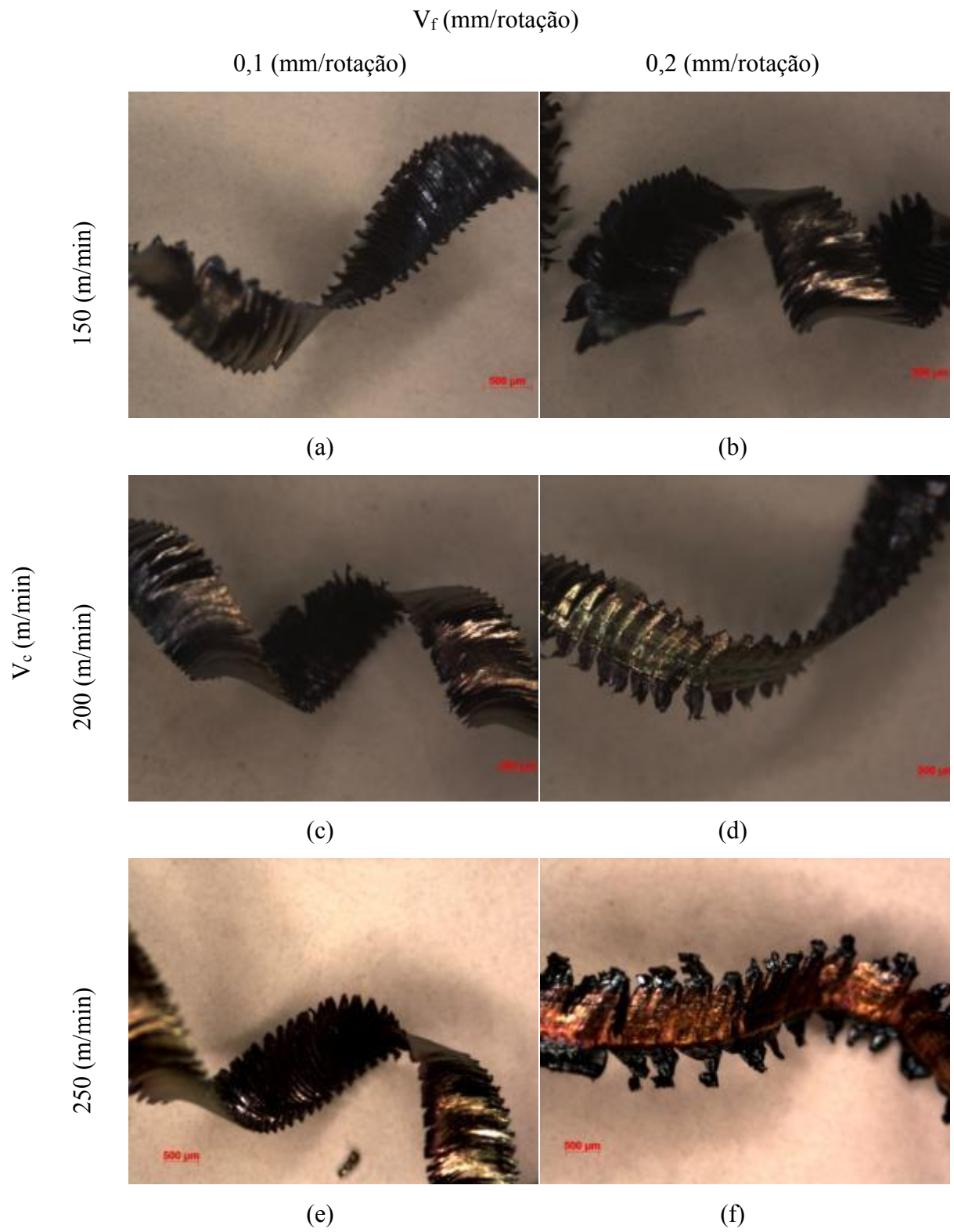
5.9 TIPOS E FORMAS DOS CAVACOS

Nas figuras 51 e 52 estão dispostos os cavacos obtidos em cada uma das condições de corte. Os cavacos obtidos variaram muito pouco, e devido as condições de corte e a dureza do material estes cavacos tiveram como mecanismo de formação, principalmente o cisalhamento.

Figura 51: Formação do cavaco para as diferentes condições de usinagem, para $a_p = 8,4$ mm



Fonte: Autoria Própria

Figura 52: Formação do cavaco para as diferentes condições de usinagem, para $a_p = 16,7$ mm

Fonte: Autoria Própria

É possível notar que os cavacos analisados não possuem diferença entre os níveis de V_c e avanço, por isso em todas as condições, o cavaco foi gerado por cisalhamento e apresentava formato helicoidal curto.

5.10 COMENTÁRIOS GERAIS

Observou-se no fresamento frontal do aço SAE 4340 endurecido, para a primeira condição de assimetria com profundidade de corte $a_p = 8,4$ mm:

- O parâmetro R_a foi maior, quanto maior o avanço utilizado, porém seu máximo ocorreu para a velocidade de $V_c = 200$ m/min;
- A rugosidade total R_t teve seu valor constante com o aumento de velocidade para o menor avanço, porém com uma velocidade de avanço superior ($V_f = 0,2$ mm/rot), o parâmetro R_t teve seu maior valor para a $V_c = 200$ m/min, assim como ocorreu na análise de R_a ;
- Nem a variação da velocidade de corte, nem a variação da velocidade de avanço causam grande variação no valor da potência, que apresenta pequenas variações;
- O valor obtido de vibração apresenta grande variação para a velocidade de corte $V_c = 200$ m/min, porém apresentam quase o mesmo valor para as velocidades de corte $V_c = 150$ m/min e $V_c = 250$ m/min;
- A emissão acústica se mantém em níveis baixos, porém cresce com o aumento da velocidade de corte V_c ou da velocidade de avanço V_f ;
- A emissão sonora apresenta o mesmo perfil de aumento para a variação da velocidade de corte.
- O maior desgaste médio de ferramenta ocorreu para o primeiro ensaio, onde coincidentemente também ocorreu uma quebra, porém nesta condição de assimetria os valores de V_b/L_c são melhores;
- O cavaco obtido para esta condição é formado por cisalhamento, isso devido as grandes forças e temperaturas envolvidas durante o processo.

Já com relação ao fresamento do aço SAE 4340 endurecido, para a segunda condição de assimetria com profundidade de corte $a_p = 16,7$ mm:

- O parâmetro R_a cresceu conforme o crescimento da velocidade e do avanço, tendo seu maior valor para $V_c = 250$ m/min e avanço de 0,2 mm/rot;
- A rugosidade total R_t teve um valor crescente para o aumento da velocidade, quando utilizada a maior velocidade de avanço $V_f = 0,2$ mm/rot, porém para a menor velocidade de avanço, ocorre um pico no valor de R_t , que volta a reduzir quando ocorre o aumento da velocidade;
- O aumento na velocidade de corte, assim como na velocidade de avanço, reduzem sensivelmente o valor da potência;
- A vibração se mantém constante para o aumento da velocidade de corte e para o aumento da velocidade de avanço;
- Os maiores valores de emissão acústica são obtidos para esta condição de assimetria;
- As maiores emissões sonoras ocorrem para as maiores velocidades, tanto de corte, quanto de avanço;
- Os maiores desgastes de ferramenta, assim como o maior número de avarias ocorreram para esta condição de corte, o que prejudicou o fator de V_b/L_c , o que indica uma menor vida para a ferramenta;
- Os cavacos formados nesta condição são cavacos de cisalhamento, isto devido as grandes forças e temperaturas envolvidas.

Comparando as duas condições de assimetria, temos:

- Os melhores parâmetros de rugosidade média ocorrem para a menor velocidade de avanço, que contribui para um melhor acabamento superficial. Quando utilizada a maior profundidade de corte (a_p), o aumento da velocidade de corte causa um aumento no valor da rugosidade, porém quando utilizado a menor profundidade de corte (a_p) o valor da rugosidade se mantém constante com o aumento da velocidade de avanço (V_f);
- A mesma análise acima pode ser realizada para os valores obtidos com a rugosidade total, porém esta quando considerada para o maior valor de profundidade de corte (a_p), demonstra uma mudança de comportamento para a menor velocidade de avanço, que passa a ter um perfil semelhante ao da maior velocidade de avanço para a menor condição de profundidade de corte;

- Os maiores valores de vibração ocorrem para a velocidade de 200 m/min, porém o aumento da velocidade, tanto de corte, quanto de avanço, faz as duas condições de assimetria terem valores muito próximos para as maiores velocidade de avanço (V_f) e de corte (V_c);
- O valor da emissão acústica é crescente com a velocidade de corte e com a velocidade de avanço para ambas as condições de assimetria;
- Os valores de emissão sonora, são maiores, conforme ocorre o aumento da velocidade, seja de corte seja de avanço.
- As melhores condições de desgaste da ferramenta ocorreram para a primeira condição de assimetria, com ($a_p = 8,4$ mm). É possível perceber que o maior número de avarias ocorreram para as condições em que a profundidade de corte era maior ($a_p = 16,7$ mm);
- Os cavacos obtidos para as duas condições de assimetria são formados por cisalhamento o que foi causado devido aos grandes esforços envolvidos e a concentração de tensões e temperaturas nas duas condições de assimetria testadas.

6 CONCLUSÃO

Com as análises obtidas através do fresamento frontal do aço SAE 4340 endurecido, utilizando ferramentas de metal duro recobertas com TiN, TiNAl, foi possível concluir que os melhores valores de rugosidade foram obtidos para a condição de assimetria com menor valor de profundidade de corte ($a_p = 8,4$ mm), caso no qual a ponta da ferramenta é o primeiro ponto de contato com a peça que está sendo usinada.

Em suma, os valores obtidos com o aumento da velocidade de avanço $V_f = 0,2$ mm/rot, causaram o aumento nas variáveis de saída como: potência, vibração e emissão acústica, sendo sua variação por muitas vezes, mais significativa do que a variação da condição de assimetria.

Os desgastes de flancos das ferramentas, foram maiores para a condição de assimetria com maior profundidade de corte ($a_p = 16,7$ mm), foi para esta mesma condição que houve um maior número de avarias, já que o primeiro ponto de contato não é o ponto que foi projetado para estes maiores esforços, e sim, um ponto qualquer na aresta principal.

Para ambas condições de assimetria o cavaco gerado, teve formação de lamelas bem definidas, que o caracterizaram como cavacos de cisalhamento.

A condição de assimetria que menos apresentou desgastes significativos, ou seja, que melhor se comportou durante o ensaio foi a condição de assimetria 1 ($a_p = 8,4$ mm) segundo os critérios de menor desgaste de ferramenta e melhores condições de rugosidade.

Para a condição de maior profundidade de corte – condição de assimetria 2 ($a_p = 16,7$ mm) houveram os maiores picos de potência e vibração, parâmetros que devem ser evitados ou minimizados no processo de usinagem.

REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S., LIRANI, J. **Tolerância, ajuste, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 87**: aço carbono e ligados para construção mecânica - designação e composição química. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10151**: acústica - avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - procedimento. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12545**: conceitos da técnica de usinagem - forças, energia, trabalho e potências - terminologia. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4287**: especificações geométricas do produto (GPS) - rugosidade: método do perfil - termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.

BHATTACHARYA, S. et al. Microstructural evolution of AISI 4340 steel during direct metal deposition process. **Materials Science and Engineering A**, Ann Arbor, v. 528, n. 6, p. 2309 – 2318, 2011.

CALLISTER JÚNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 8.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora SA, 2013. 817p.

CARPINETTI, L. C. R.; GONÇALVES FILHO, E. V.; PORTO, A. J. V.; JASINEVICIUS, R. G. **Rugosidade superficial**: conceitos e princípios de medição. São Carlos: Seção de Publicações da EESC-USP, 1996. 51 p. (apostila).

CATAPAN, M. F. **Apostila de desenho técnico 1**: III parte. Paraná: UFPR, 2013. 42 p. (apostila).

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**: materiais de construção mecânica. 2. ed. Local: McGraw-Hill, 1986. v.3.

DESHPANDE, N.; FOFANA, M. S. Nonlinear regenerative chatter in turning. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Worcester, v. 17, n. 1-2, p. 107–112, 2001.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. **DIN 8580**: manufacturing process – terms and definitions, division. Germany, 2003.

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

EL RAYES, M. M.; EL-DANAF, E. A.; ALMAJID, A. A. Ultrasonic characterization of heat-treatment effects on SAE-1040 and -4340 steels. **Journal of Materials Processing Technology**, Riyadh, v. 216, p. 188–198, 2015.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2013. 751 p.

GGD METALS. **Catálogo técnico: aços e metais**. Disponível em: <<http://www.ggdmetals.com.br/produto/sae-4340>>. Acesso em: 02 dez. 2018.

GUO, Y. B.; AMMULA, S. C. Real-time acoustic emission monitoring for surface damage in hard machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Tuscaloosa, v. 45, n. 14, p. 1622–1627, 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **3685: tool-life testing with single-point turning tools**. Genebra, 1993.

IGBAL A.; NING H.; KHAN I. Modeling the effects of cutting parameters in MQL employed finish hard-milling process using D-optimal method. **Journal of materials processing technology**, Taxila, p. 319-390, 2008.

KALPAKJIAN, S; SCHMID, S. **Manufacturing, engineering and technology**. New York City: Pearson Education, 2010.

KANT, G.; SANGWAN, K. S. Prediction and optimization of machining parameters for minimizing power consumption and surface roughness in machining. **Journal of Cleaner Production**, Pilani, v. 83, p. 151-164, 2014.

LAURO, C.H; BRANDÃO, L.C; BALDO, D; REIS, R.A; DAVIM, J.P. Monitoring and processing signal applied in machining processes: a review. **Measurement**, São João Del Rei , v. 58, p. 73-86, 2014.

LI, X. A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Qinhuandao, v. 42, n. 2, p. 157–165, 2002.

LIMA, F. E; CORRÊA, M. Usinagem de materiais endurecidos. **Revista tecnologia**, Fortaleza, v. 23, n. 1, p. 38-44, 2002.

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

MAIA, L. H. A; ABRAO, A. M; VASCONCELOS, W. L; SALES, W. F; MACHADO, A. R. A new approach for detection of wear mechanisms and determination of tool life in turning using acoustic emission. **Tribology International**, Belo Horizonte, v. 92, p. 519–532, 2015.

MANDAL, N.; DOLOI, B.; MONDAL, B.; DAS, R., Optimization of flank wear using Zirconia Toughened Alumina(ZTA) cutting tool: Taguchi method and Regression analysis, **Measurement**, v.44 p. 2149–2155, 2011.

METALS HANDBOOK. **Machining**. Estados Unidos: ASM Internacinal, 2004. v. 16, 9499 p.

MORADI, H; VOSSOUGH, G; BEHZAD, M; MOVAHHEDY, M. R. Vibration absorber design to suppress regenerative chatter in nonlinear milling process: application for machining of cantilever plates. **Applied Mathematical Modelling**, Tehran, v. 39, n. 2, p. 600–620, 2015.

PALMA, E. S. **Tolerância de acabamento: Rugosidade**. Belo Horizonte: PUC Minas, 2006. 20 p. (apostila de metrologia).

PIRATELLI FILHO, A. **Rugosidade superficial**. In: SEMINÁRIO DE METROLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, 3., Uberlândia, 2011. **Anais...** Uberlândia, 2011.

ROMEIRO, S. B. B. **Química na siderurgia**. Porto Alegre: UFRGS, 1977.

REDDY, N. S.; RAO, P. V. Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. New Delhi, v. 26, p. 1202-1210, 2005.

RS DELIVERS. **LEM AT series current sensor**. Disponível em: <<https://br.rsdelivers.com/product/lem/at-100-b10/lem-at-series-current-sensor/0497356>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

SAHOO, A. K.; SAHOO, B. Experimental investigations on machinability aspects in finish hard turning of AISI 4340 steel using uncoated and multilayer coated carbide inserts. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, Odisha, v. 45, n. 8, p. 2153–2165, 2012.

SAHU, S.; CHOUDHURY, B. B. Optimization of surface roughness using taguchi methodology and prediction of tool wear in hard turning tools. **Materials today: proceedings**, v. 2, n. 4-5, p. 2615–2623, 2015.

SECO TOOLS AB. **Tecnologia de fresamento**. Sorocaba, 2016.

SHARMA, V.; PANDEY, P. M. Optimization of machining and vibration parameters for residual stresses minimization in ultrasonic assisted turning of 4340 hardened steel. **Ultrasonics**, New Delhi, v. 70, p. 172–182, 2016.

SILVA, L. R. ; BIANCHI, E.C. ; CATAI, R.E. ; FUSSE, R.Y. ; FRANÇA, T.V. ; AGUIAR, P. R. Study on the behavior of the minimum quantity lubricant - MQL technique under different lubricating and cooling conditions when grinding ABNT 4340 steel. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 2, p. 192–199, jun. 2005.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. 734 p.

SOARES, L. R. L. **Fresamento do aço 4340 temperado e revenido utilizando ferramentas de metal duro recobertas**. 2017. 47 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

SONG, Q; JU, G; LIU, Z; AI, X. Subdivision of chatter-free regions and optimal cutting parameters based on vibration frequencies for peripheral milling process. **International Journal of Mechanical Sciences**, Jinan, v. 83, p. 172–183, 2014.

SREEJITH, P.S.; NGOI, B. K. A. Dry machining: machining of the future. **Journal of Materials Processing Technology**, Singapore, v.101, p. 287-291, 2000.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 3.ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1993. 249 p.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 3.ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005, 314 p.

TRENT, E.M; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. 2. ed. Butterworth-Heinemann, Woburn: Butterworth - Heinemann, 2000.

VIKRAM, K. A.; RATNAM, C.; NARAYANA, K. S. Vibration diagnosis and prognostics of turn-milling operations using hss and carbide end mill cutters. **Procedia Technology**, Visakhapatnam, v. 23, p. 217–224, 2016.

WEREMCZUK, A.; RUSINEK, R.; WARMINSKI, J. The concept of active elimination of vibrations in milling process. **Procedia CIRP**, Lublin, v. 31, p. 82–87, 2015.

APÊNDICE

Figura 53: Tabela de correlação para R_a - Minitab

General Factorial Regression: R_a (um) versus Blocks; Condição de Assimetria; Vc; Vf

Factor Information

Factor	Levels	Values
Condição de Assimetria	2	ap 8,4; ap 16,7
Vc	3	150; 200; 250
Vf	2	0,1; 0,2

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	13	0,218172	0,016782	7,02	0,000
Blocks	2	0,008686	0,004343	1,82	0,186
Linear	4	0,122317	0,030579	12,80	0,000
Condição de Assimetria	1	0,001708	0,001708	0,72	0,407
Vc	2	0,004100	0,002050	0,86	0,438
Vf	1	0,116508	0,116508	48,76	0,000
2-Way Interactions	5	0,083188	0,016638	6,96	0,000
Condição de Assimetria*Vc	2	0,020611	0,010305	4,31	0,026
Condição de Assimetria*Vf	1	0,060188	0,060188	25,19	0,000
Vc*Vf	2	0,002389	0,001195	0,50	0,613
3-Way Interactions	2	0,003981	0,001990	0,83	0,448
Condição de Assimetria*Vc*Vf	2	0,003981	0,001990	0,83	0,448
Error	22	0,052566	0,002389		
Total	35	0,270738			

Fonte: Autoria Própria

Figura 54: Tabela de correlação para R_t - Minitab

General Factorial Regression: R_t (um) versus Blocks; Condição de Assimetria; Vc; Vf

Factor Information

Factor	Levels	Values
Condição de Assimetria	2	ap 8,4; ap 16,7
Vc	3	150; 200; 250
Vf	2	0,1; 0,2

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	13	33,6207	2,5862	8,04	0,000
Blocks	2	0,1145	0,0573	0,18	0,838
Linear	4	20,3224	5,0806	15,79	0,000
Condição de Assimetria	1	1,4145	1,4145	4,40	0,048
Vc	2	5,7285	2,8643	8,90	0,001
Vf	1	13,1793	13,1793	40,97	0,000
2-Way Interactions	5	9,5690	1,9138	5,95	0,001
Condição de Assimetria*Vc	2	1,5593	0,7796	2,42	0,112
Condição de Assimetria*Vf	1	6,6719	6,6719	20,74	0,000
Vc*Vf	2	1,3378	0,6689	2,08	0,149
3-Way Interactions	2	3,6148	1,8074	5,62	0,011
Condição de Assimetria*Vc*Vf	2	3,6148	1,8074	5,62	0,011
Error	22	7,0765	0,3217		
Total	35	40,6972			

Fonte: Autoria Própria

Figura 55: Tabela de correlação para Potência – Minitab

General Factorial Regression: Potência (W) versus Blocks; Condições de Assimetria; Vc; Vf

Factor Information

Factor	Levels	Values
Condições de Assimetria	2	ap 8,4; 16,7
Vc	3	150; 200; 250
Vf	2	0,1; 0,2

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	12	141159	11763	20,37	0,000
Blocks	1	106036	106036	183,64	0,000
Linear	4	24775	6194	10,73	0,001
Condições de Assimetria	1	1892	1892	3,28	0,098
Vc	2	5278	2639	4,57	0,036
Vf	1	17605	17605	30,49	0,000
2-Way Interactions	5	8134	1627	2,82	0,071
Condições de Assimetria*Vc	2	2630	1315	2,28	0,149
Condições de Assimetria*Vf	1	5483	5483	9,50	0,010
Vc*Vf	2	21	11	0,02	0,982
3-Way Interactions	2	2214	1107	1,92	0,193
Condições de Assimetria*Vc*Vf	2	2214	1107	1,92	0,193
Error	11	6351	577		
Total	23	147510			

Fonte: Autoria Própria

Figura 56: Tabela de correlação para Emissão Acústica - Minitab

General Factorial Regression: Emissão Acústica versus Blocks; Condições de Ass; Vc; Vf

Factor Information

Factor	Levels	Values
Condições de Assimetria	2	ap 8,4; 16,7
Vc	3	150; 200; 250
Vf	2	0,1; 0,2

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	12	0,394586	0,032882	7,40	0,001
Blocks	1	0,026667	0,026667	6,00	0,032
Linear	4	0,320148	0,080037	18,01	0,000
Condições de Assimetria	1	0,170353	0,170353	38,33	0,000
Vc	2	0,066250	0,033125	7,45	0,009
Vf	1	0,083544	0,083544	18,80	0,001
2-Way Interactions	5	0,043338	0,008668	1,95	0,165
Condições de Assimetria*Vc	2	0,021951	0,010976	2,47	0,130
Condições de Assimetria*Vf	1	0,016328	0,016328	3,67	0,082
Vc*Vf	2	0,005059	0,002529	0,57	0,582
3-Way Interactions	2	0,004433	0,002217	0,50	0,620
Condições de Assimetria*Vc*Vf	2	0,004433	0,002217	0,50	0,620
Error	11	0,048883	0,004444		
Total	23	0,443469			

Fonte: Autoria Própria

Figura 57: Tabela de correlação para Vibração – Minitab

General Factorial Regression: Vibração (mm/seg versus Blocks; Condições de Ass; Vc; Vf

Factor Information

Factor	Levels	Values
Condições de Assimetria	2	ap 8,4; 16,7
Vc	3	150; 200; 250
Vf	2	0,1; 0,2

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	12	382,20	31,85	0,99	0,512
Blocks	1	38,79	38,79	1,20	0,296
Linear	4	111,35	27,84	0,86	0,516
Condições de Assimetria	1	19,61	19,61	0,61	0,452
Vc	2	68,56	34,28	1,06	0,378
Vf	1	23,18	23,18	0,72	0,415
2-Way Interactions	5	168,51	33,70	1,05	0,439
Condições de Assimetria*Vc	2	62,06	31,03	0,96	0,412
Condições de Assimetria*Vf	1	37,42	37,42	1,16	0,304
Vc*Vf	2	69,03	34,52	1,07	0,376
3-Way Interactions	2	63,54	31,77	0,99	0,404
Condições de Assimetria*Vc*Vf	2	63,54	31,77	0,99	0,404
Error	11	354,73	32,25		
Total	23	736,93			

Fonte: Autoria Própria

Figura 58: Tabela de correlação para Emissão Sonora - Minitab

General Factorial Regression: Emissão Sonora (versus Blocks; Condições de Ass; Vc; Vf

Factor Information

Factor	Levels	Values
Condições de Assimetria	2	ap 8,4; 16,7
Vc	3	150; 200; 250
Vf	2	0,1; 0,2

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	12	357,208	29,767	93,12	0,000
Blocks	1	1,058	1,058	3,31	0,096
Linear	4	270,603	67,651	211,62	0,000
Condições de Assimetria	1	5,134	5,134	16,06	0,002
Vc	2	137,125	68,563	214,48	0,000
Vf	1	128,344	128,344	401,48	0,000
2-Way Interactions	5	54,817	10,963	34,30	0,000
Condições de Assimetria*Vc	2	3,522	1,761	5,51	0,022
Condições de Assimetria*Vf	1	37,901	37,901	118,56	0,000
Vc*Vf	2	13,394	6,697	20,95	0,000
3-Way Interactions	2	30,731	15,365	48,07	0,000
Condições de Assimetria*Vc*Vf	2	30,731	15,365	48,07	0,000
Error	11	3,516	0,320		
Total	23	360,725			

Fonte: Autoria Própria