

LARISSA MANUCCI

**Análise comparativa de diferentes recobrimentos de ferramentas de metal duro no
torneamento do aço AISI 52100**

Larissa Manucci

Análise comparativa de diferentes recobrimentos de ferramentas de metal duro no torneamento do aço AISI 52100

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 Cleber de Sampaio Alves

	Manucci, Larissa
M294a	Análise comparativa de diferentes recobrimentos de ferramentas de metal duro no torneamento do aço AISI 52100 / Larissa Manucci – Guaratinguetá, 2021. 109 f : il. Bibliografia: f. 107-109 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021. Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves 1. Usinagem. 2. Ferramentas de corte. 3. Aspereza de superfície. I. Título.
	CDU 621.9

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

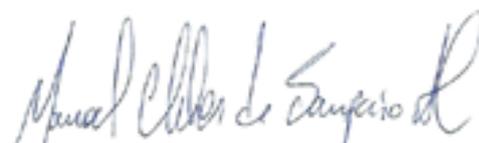
LARISSA MANUCCI

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

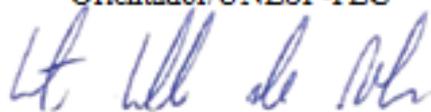
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECANICA

Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
Coordenador

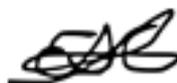
BANCA EXAMINADORA:



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



Prof. Msc. EVERTON COELHO DE MEDEIROS
UNESP-FEG



Prof. Eng. EMANUELE SCHINEIDER CALLISAYA
UNESP-FEG

DADOS CURRICULARES

LARISSA MANUCCI

NASCIMENTO	13.01.1998 – Mogi das Cruzes / SP
FILIAÇÃO	Luis Carlos Manucci Maria Suzana Manucci
2016/2021	Curso de Graduação Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

dedico este trabalho de modo especial, aos meus pais, que sempre me apoiaram em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida, do amor e da sabedoria. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos;

ao meu orientador, Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves que aceitou de prontidão ser meu orientador e me incentivou durante todo o processo. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

aos meus pais Suzana e Luis, que nunca mediram esforços para me apoiar nos meus estudos e sempre estiveram ao meu lado em todos os desafios da vida com uma palavra de incentivo, de conforto e de amor;

ao meu namorado Vinicius, meu companheiro de curso e de vida, que sempre esteve ao meu lado nos melhores e piores momentos dessa jornada, com muita paciência;

à todos os meus amigos da equipe FEG Robótica, que compartilharam comigo alguns dos melhores momentos durante esses anos e se tornaram uma segunda família pra mim;

à todos os meus amigos, amigas e colegas, todos aqueles que cruzaram comigo em algum momento dessa jornada e tiveram, de alguma forma, um papel importante na caminhada;

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Sábio é aquele que conhece os limites da
própria ignorância”

Sócrates

RESUMO

O constante desenvolvimento e aprimoramento dos aços e de outros materiais se deve à necessidade de aprimoramento dos processos de fabricação, otimizando os custos, a produtividade e reduzindo os impactos no meio ambiente. Neste contexto, as ferramentas devem ser aprimoradas de forma constante. Para estes fins, a usinagem a seco e as ferramentas de corte recobertas estão sendo cada vez mais exploradas. Sendo assim, este trabalho buscou comparar o desempenho de uma ferramenta de metal duro com recobrimento de TiCN+Al₂O₃ pelo processo CVD e uma ferramenta de metal duro com recobrimento de TiAlSiN pelo processo PVD, na usinagem do aço AISI 52100, o qual apresenta múltiplas propriedades que o tornam ideal para a fabricação, principalmente, de rolamentos e componentes de precisão. O Aço AISI 52100 apresenta um custo baixo e propriedades mecânicas muito boas. Foram feitos vários ensaios e análises a fim de estudar o comportamento da rugosidade, potência de usinagem, emissão acústica, vibração, desgaste das ferramentas, além da identificação dos tipos e formação de cavacos. Também foi verificado a influência da velocidade de corte e avanço no processo e na rugosidade final do material usinado. O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Estudo da Usinagem da UNESP – Guaratinguetá, utilizando um centro de torneamento CNC da marca Romi, modelo GL 240M, com um sistema de aquisição de dados para coleta de potência, vibração e emissão acústica, aplicando diferentes parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade). Os corpos de prova de aço AISI 52100 foram usinados com velocidade de corte de 60 e 100 m/min e avanços de 0,05 e 0,1 mm/rot, tendo a profundidade de corte fixa em 0,25mm e o comprimento de avanço, também constante, em 28mm. De maneira geral, os resultados obtidos durante este trabalho demonstraram que a ferramenta TH1000 revestida com TiAlSiN pelo processo PVD manifestou um melhor desempenho durante o processo de usinagem do aço AISI 52100 nos diferentes parâmetros de saída analisados, devido a sua dureza mais elevada. Por meio da análise de variância constatou-se que os melhores níveis de rugosidade foram obtidos utilizando-se uma velocidade de 100 m/min e avanço de 0,05 mm/rot. Além disso o menor desgaste relativo da ferramenta TH1000 foi obtido com velocidade de corte de 60 m/min e avanço de 0,05 mm/rot, sendo que a variação do avanço não influenciou de forma significativa.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem. CVD. PVD. Rugosidade. TiAlSiN. TiCN+Al₂O₃. AISI 52100.

ABSTRACT

The constant development and improvement of steel and other materials is due to the need to improve manufacturing processes, optimizing costs, productivity and reducing impacts on the environment. In this context, the tools must be constantly improved. For these purposes, dry machining and coated tools are being increasingly explored. Therefore, this work had the purpose to compare the performance of a CVD-coated carbide tool ($\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$) and a PVD-coated carbide tool (TiAlSiN) when machining AISI 52100 steel, which has multiple properties that make it ideal for manufacturing mainly precision bearings and components. It has a low cost and good mechanical properties. Studies were carried out on the behavior of roughness, machining power, acoustic emission, vibration, tool wear, in addition to the identification of types and chip formation. It was also verified the influence of the cutting speed and feed in the process and in the final roughness of the machined material. The work was developed at the Machining Study Laboratory at Unesp - Guaratinguetá, using a Romi CNC turning center, model GL 240M, with a data acquisition system for power collection, vibration and acoustic emission, applying different parameters of speed, cut and feed rate. The AISI 52100 steel sample were machined with a cutting speed of 60 and 100 m / min and feed rate of 0.05 and 0.1 mm/rev, with the cutting depth fixed at 0.25 mm and the feed rate length, also constant, at 28mm. In general, the results obtained during this work showed that the TH1000 tool coated with TiAlSiN by the PVD process indicated a better performance during the machining process of AISI 52100 steel. Using ANOVA it was found that the best levels of roughness were obtained using a speed of 100 m / min and an feed rate of 0.05 mm / rev. In addition, the lower relative wear of the TH1000 tool was obtained with a cutting speed of 60 m / min and a feed rate of 0.05 mm / rot, and the feed rate variation did not influence significantly.

KEYWORDS: Machining. CVD. PVD. TiSiAlN . Roughness. $\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$. AISI 52100.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos processos de fabricação	24
Figura 2 – Tipos de tornos.....	25
Figura 3 – Direção dos movimentos que causam diretamente a saída do cavaco	26
Figura 4 – Influência do avanço no acabamento superficial da peça usinada.....	26
Figura 5 – Exemplos de corte ortogonal	28
Figura 6 – Ilustração da formação do cavaco e o processo e de recalque dele	29
Figura 7 – Esquema com as zonas de cisalhamento primária e secundária	29
Figura 8 – Formas de cavaco produzidas durante o processo de usinagem	30
Figura 9 – Influência do avanço e da profundidade de corte da forma do cavaco	31
Figura 10 – Histórico do desenvolvimento de materiais para ferramentas	33
Figura 11 – Diagrama de dureza-tenacidade dos materiais de ferramentas de corte.....	34
Figura 12 – Lista de materiais para ferramentas de corte	35
Figura 13 – Influência da temperatura e da percentagem de cobalto na dureza.....	36
Figura 14 – Processo de deposição química de vapor	38
Figura 15 – Influência da temperatura na condutividade térmica dos revestimentos TiC, TiN e Al ₂ O ₃	40
Figura 16 – Evaporação por arco.....	41
Figura 17 – Ilustração de um <i>sputtering</i> convencional	42
Figura 18 – Esquema do processo de íons	43
Figura 19 – Áreas principais de sujeição a desgaste em uma ferramenta de corte.....	46
Figura 20 – Parâmetros e regiões para medição do desgaste	47
Figura 21 – Desgaste de flanco na ferramenta de corte	48
Figura 22 – Representação esquemática do desgaste de cratera	49
Figura 23 – Desgaste de entalhe em uma ferramenta de corte.....	49
Figura 24 – Dependência dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da temperatura.....	50
Figura 25 – Mecanismos de desgaste que ocorrem nas ferramentas de corte de acordo com Trent e Wright.....	51
Figura 26 – Deformação na ponta de uma ferramenta.....	52
Figura 27 – Exemplificação de uma aresta postiça de corte	53
Figura 28 – Influência do avanço e forma da ferramenta no acabamento da superfície.....	55
Figura 29 – Rugosidade média (Ra)	57

Figura 30 – Rugosidade Total (Rt).....	57
Figura 31 – Exemplo de sinal de emissão acústica.....	60
Figura 32 – Principais fontes de emissão acústica no torneamento.....	61
Figura 33 – Desenho técnico do corpo de prova com cotas.....	63
Figura 34 – Ferramentas de metal duro utilizadas.....	64
Figura 35 – Ferramenta com revestimento TiAlSiN, com quebra cavaco MF5 (TH1000)	65
Figura 36 – Substrato e revestimento PVD.....	66
Figura 37 – Dimensões da ferramenta em mm.....	66
Figura 38 – Ferramenta com revestimento Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ , com quebra cavaco MF5(TH1500).	67
Figura 39 – Substrato e revestimento CVD.....	67
Figura 40 – Ferramenta de corte com quebra-cavaco MF5	68
Figura 41 – Centro de Torneamento CNC Romi modelo GL 240M	69
Figura 42 – Rugosímetro da marca Mahr modelo Marsurf M300.....	69
Figura 43 – Microscópio óptico de medição da marca Mahr, modelo MarVision MM20	70
Figura 44 – Microscópio da marca Zeiss, modelo Stemi2000	70
Figura 45 – Sensor de corrente, marca LEM modelo AT100 B10	71
Figura 46 – Sensor piezelétrico da marca Vibro Control e modelo TV100	73
Figura 47 – Módulo de emissão acústica (1), sensor (2) e amplificador (3).....	74
Figura 48 – Corpo de prova durante o processo de usinagem.....	75
Figura 49 – Fixação da ferramenta	76
Figura 50 – Gráfico da média da potência consumida durante os ensaios.....	79
Figura 51 – Média da potência consumida durante os ensaios	80
Figura 52 – Influência das interações dos parâmetro sobre a potência consumida durante o ensaio	80
Figura 53 – Gráfico da média das vibrações durante os ensaios	82
Figura 54 – Média da vibração gerada durante os ensaios.....	83
Figura 55 – Influência das interações dos parâmetro sobre a vibração gerada durante o ensaio	83
Figura 56 – Gráfico da média da emissão acústica durante os ensaios	85
Figura 57 – Média da emissão acústica gerada durante os ensaios	86
Figura 58 – Influência das interações dos parâmetro sobre a emissão acústica gerada durante o ensaio	86
Figura 59 – Gráfico da média da rugosidade total.....	88

Figura 60 – Média da rugosidade total obtida durante os ensaios.....	89
Figura 61 – Influência das interações dos parâmetro sobre a rufosidade total obtida durante o ensaio	89
Figura 62 – Gráfico da média da rugosidade média	91
Figura 63 – Média da rugosidade média obtida durante os ensaios	92
Figura 64 – Relação desgaste da ferramenta por comprimento usinado.....	94
Figura 65 – Média do desgaste de flanco relativo ocasionado durante os ensaios	95
Figura 66 – Gráfico da média da força de corte	99
Figura 67 – Média da força de corte gerada durante os ensaios.....	100
Figura 68 – Influência das interações dos parâmetro sobre a força de corte gerada durante o ensaio	101
Figura 69 – Gráfico da média da pressão específica de corte	103
Figura 70 – Média da pressão específica de corte gerada durante os ensaios.....	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Sistemas SAE e AISI/ABNT de classificação de aços	22
Quadro 2 – Composição Química nominal do aço AISI 52100 (porcentagem em peso)	23
Quadro 3 – Propriedades de camadas de revestimento	39
Quadro 4 – Propriedades dos materiais utilizados no processo PVD	43
Quadro 5 – Comparação de ferramentas revestidas.....	44
Quadro 6 – Fatores que influenciam no acabamento de uma superfície usinada.....	54
Quadro 7 – Principais parâmetros de rugosidade	56
Quadro 8 – Codificação da Pastilha de Corte.....	65
Quadro 9 – Dados da análise de variância para a potência de corte.....	79
Quadro 10 – Dados da análise de variância para a vibração	82
Quadro 11 – Dados da análise de variância para a emissão acústica.....	85
Quadro 12 – Dados da análise de variância para a rugosidade total.....	88
Quadro 13 – Dados da análise de variância para a rugosidade média	91
Quadro 14 – Dados da análise de variância para o desgaste de flanco relativo	94
Quadro 15 – Desgastes das ferramentas de corte ao final do processo com ampliação de 50x.	96
Quadro 16 – Dados da análise de variância para a força de corte	100
Quadro 17 – Dados da análise de variância para a pressão específica de corte	103
Quadro 18 – Imagens e classificação dos cavacos formados em cada processo.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço AISI 52100	63
Tabela 2 – Recomendações de parâmetros para a ferramenta de PVD TH1000.....	66
Tabela 3 – Recomendações de uso para a ferramenta de CVD TH1500 da Seco	67
Tabela 4 – Ensaio realizados	75
Tabela 5 – Condições experimentais.....	77
Tabela 6 – Dados de desgaste de flanco relativo, Lc e a relação entre eles	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute -AISI
CBN	Cubic Boron Nitride
CNC	Comando numérico computadorizado
CVD	Chemical Vapour Deposition
EA	Emissão Acústica
HB	Hardness Brinell (dureza Brinell)
HRC	Hardness Rockwell C (dureza Rockwell C)
HSS	High Speed Steel
HV	Hardness Vickers (dureza Vickers)
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Brasileira Registrada
PCD	Policristalino de Diamante
PVD	Physical Vapour Deposition
SAE	Society of Automotive Engineers
UCC	Tensão de Corrente Contínua
RMS	Valor Quadrático Médio

LISTA DE SÍMBOLOS

C	carbono
Mn	manganês
S	enxofre
Ni	níquel
Cr	cromo
Mo	molibidênio
B	boro
V	vanádio
Si	silício
Cu	cobre
P	fósforo
S	enxofre
V_c	velocidade de corte
d	diâmetro
η	rotação da peça
V_f	velocidade de avanço
f	avanço
Ti	titânio
N	nitrogênio
Al	alumínio
TiCN	carbonitreto de titânio
TiAlN	nitreto de titânio alumínio
AlTiN	nitreto de alumínio titânio
WC	carboneto de tungstênio
Co	cobalto
W	tungstênio
TiC	carboneto de titânio
Al ₂ O ₃	óxido de alumínio
TiN	nitreto de titânio
W	Watts
K	Kelvin
AlTiSiN	nitreto de titânio, alumínio e silício
CrN	nitreto de cromo
Kt	profundidade de cratera
V_B	desgaste de flanco médio
R_a	rugosidade média
R_t	rugosidade total
P_c	potência de corte
F_c	força de corte
P_f	potência de avanço
F_f	força de avanço
P_m	potência fornecida pelo motor
K_s	pressão específica de corte
a_p	profundidade de corte
Fe	ferro
I	corrente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	188
2	OBJETIVO	20
2.1	GERAL.....	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	AÇOS	21
3.1.1	Aço AISI 52100	22
3.2	USINAGEM	23
3.2.1	Torneamento	25
3.2.1.1	Parâmetros de corte para o processo de torneamento	25
3.2.2	Formação de Cavaco	27
3.2.2.1	Tipos e formas de cavaco	29
3.2.3	Fluidos de Corte	31
3.2.3.1	Usinagem a seco	32
3.2.4	Materiais para ferramentas de corte	33
3.2.4.1	Metal duro	35
3.2.4.2	Metal duro com recobrimento	36
3.2.4.2.1	Processo CVD	37
3.2.4.2.2	Processo PVD	40
3.3	DESGASTE E AVARIA DE FERRAMENTA	45
3.3.1	Desgastes de ferramentas de corte	46
3.3.1.1	Tipo de desgaste de ferramentas de corte.....	47
3.3.2	Mecanismos de desgaste de ferramentas de corte	49
3.4	ACABAMENTO SUPERFICIAL	53
3.4.1	Parâmetros de rugosidade	55
3.4.1.1	Rugosidade média (Ra)	56
3.4.1.2	Rugosidade total (Rt)	57
3.5	POTÊNCIA DE USINAGEM.....	58
3.6	EMISSÃO ACÚSTICA	59
3.7	VIBRAÇÃO	61
4	MATERIAIS E MÉTODOS	63
4.1	MATERIAL.....	63

4.2	CORPO DE PROVA	63
4.3	FERRAMENTAS DE CORTE.....	64
4.3.1	Ferramenta 1: Metal Duro com revestimento PVD da marca Seco.....	64
4.3.2	Ferramenta 2: Metal Duro com revestimento CVD da marca Seco	66
4.3.3	Quebra-cavaco	68
4.4	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	68
4.4.1	Centro de Torneamento CNC.....	68
4.4.2	Rugosímetro	69
4.4.3	Microscópios.....	70
4.5	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	71
4.5.1	Potência de corte	71
4.5.2	Vibração	73
4.5.3	Emissão acústica.....	73
4.6	TIPOS E FORMAS DE CAVACO	74
4.7	PROCEDIMENTOS E PROCESSO DE USINAGEM	74
4.8	TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE DADOS	76
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
5.1	PRINCIPAIS EFEITOS PARA POTÊNCIA DE CORTE	78
5.2	PRINCIPAIS EFEITOS PARA A VIBRAÇÃO	81
5.3	PRINCIPAIS EFEITOS PARA A EMISSÃO ACÚSTICA	84
5.4	PRINCIPAIS EFEITOS PARA A RUGOSIDADE TOTAL (RT)	87
5.5	PRINCIPAIS EFEITOS PARA A RUGOSIDADE MÉDIA (RA).....	90
5.6	PRINCIPAIS EFEITOS PARA O DESGASTE DE FLANCO	93
5.7	PRINCIPAIS EFEITOS PARA A FORÇA DE CORTE.....	99
5.8	PRINCIPAIS EFEITOS PARA A PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE	102
5.9	TIPOS E FORMAS DE CAVACO	105
6	CONCLUSÃO	109
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	111
	REFERÊNCIAS.....	112

1 INTRODUÇÃO

Pesquisas e desenvolvimentos vêm sendo colocados em evidência pelos fabricantes devido ao grande avanço tecnológico. É nesse ambiente que novas tecnologias vêm ganhando destaque e com elas surgem também os desafios para os especialistas em usinagem. Foi em razão destes avanços que surgiram as ferramentas de corte revestidas e muitas outras inovações no meio da usinagem.

No geral, quando o assunto é usinagem, é notável que há um enorme interesse na descoberta de meios que otimizem o processo produtivo. Por essa razão, é imprescindível que as situações criadas favoreçam o desempenho do produto, da fabricação e do uso. Para tanto, se faz necessário o uso de equipamentos, materiais e ferramentas adequados e de qualidade.

No quesito de comparação para novos materiais o aço costuma ser tratado como referencial. Isso se deve ao fato de que são realizadas descobertas ligadas ao ferro e suas ligas continuamente. Essa é uma das razões pela qual o aço se mantém como um material muito próspero e com um consumo anual de bilhões de toneladas segundo a *World Steel Association*. Neste trabalho, será analisado o aço AISI 52100, o qual apresenta múltiplas propriedades que o tornam ideal para a fabricação, principalmente, de rolamentos e componentes de precisão. Ele apresenta um custo baixo e propriedades mecânicas muito boas.

A usinagem a seco é uma alternativa mais ecológica que surge frente aos malefícios causados pelo uso de lubrificantes, porém, para que ela seja vantajosa, é necessário um estudo a fim de alcançar um nível satisfatório de qualidade, com as mesmas variáveis de saída do processo e a mesma produtividade (GOINDI; SARKAR, 2017).

Em resposta aos esforços para obter um nível satisfatório de qualidade no torneamento a seco, uma das opções mais viáveis é o uso de ferramentas de metal duro com recobrimento, o qual traz inúmeros benefícios, como redução de potência e aumento das velocidades de corte, assim como a capacidade de conciliação entre dureza e tenacidade.

Como todo processo, a usinagem também apresenta algumas desvantagens, entre elas pode-se destacar a menor velocidade de produção, dessa forma, qualquer modificação e melhora no processo acarreta ganhos de produtividade significativos. Outro inconveniente do processo de usinagem é o seu custo superior de aquisição e manutenção, além da necessidade de mão de obra qualificada.

O torneamento de aços está em maior destaque devido ao desenvolvimento e estudo de novos materiais para ferramentas de corte, os quais apresentam elevada dureza e uma maior

resistência ao desgaste em temperaturas elevadas. O torneamento tem como vantagens a possibilidade de obtenção de geometrias simples e complexas; e o seu corte contínuo

Neste trabalho, será analisado os efeitos de parâmetros como avanço e a velocidade de corte na usinagem a seco do aço AISI 52100, por meio de ferramentas de metal duro recobertas pelo processo CVD e PVD.

2 OBJETIVO

2.1 GERAL

Avaliar a usinabilidade do aço AISI 52100 e o desempenho de duas ferramentas de corte de metal duro revestidas com $\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3$ (CVD) e TiSiAlN (PVD) no processo de torneamento a seco.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a influência de dois diferentes tipos de revestimentos em insertos de metal duro, sendo: $\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3$ (CVD) e TiSiAlN (PVD);
- Avaliar o comportamento da potência de usinagem, rugosidade, vibração, emissão acústica e desgaste das ferramentas de corte e os tipos e as formas de cavacos originados da usinagem utilizando diferentes revestimentos e parâmetros de corte;
- Analisar os efeitos da variação da velocidade de corte e avanço para os diferentes revestimentos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AÇOS

Os aços podem ser definidos como uma mistura entre ferro e carbono, sendo assim, uma liga. Nessa liga podem ainda ser incorporados concentrações de alguns outros elementos, como silício, fósforo e outros, dependendo da finalidade desejada. Comumente, a concentração de carbono na composição pode variar entre 0,05% a 2% (UNTERWEISER, 1995).

De acordo com Modenesi (2011), a classificação dos diferentes tipos de aço se dá de acordo com a microestrutura, composição química, propriedades mecânicas ou particularidades de fabricação.

Via de regra, a resistência mecânica dos aços carbono aumenta e as suas ductilidade e soldabilidade diminuem à medida que o teor de carbono aumenta. (MODENESI, 2011).

Alguns dos aços mais comuns são classificados de acordo com a concentração de carbono – quais sejam: aços com baixo, médio e alto teor de carbono (CALLISTER, 2008):

- Aços com baixo teor de Carbono: De acordo com CALLISTER (2008), estes são os aços produzidos em maior quantidade e os de menor custo de produção, eles contêm, geralmente, menos do que aproximadamente 0,25%p C. A sua microestrutura consiste em ferrita e perlita. Sendo assim, geralmente, apresentam baixas dureza e resistência, porém possuem ductilidade e tenacidade excelentes, além de serem usináveis e soldáveis.
- Aços com médio teor de Carbono: De acordo com CALLISTER (2008), os aços dessa categoria possuem entre 0,25 e 0,60%p C (aproximadamente). Quando tratadas termicamente, estas ligas apresentam uma maior resistência em relação às de baixo carbono, porém prejudicam sua ductibilidade e tenacidade.
- Aços com alto teor de Carbono: De acordo com CALLISTER (2008), estes possuem teores de Carbono entre 0,60 e 1,4%p. Dentre os aços carbonos estes se destacam por ser os mais duros e mais resistentes, sendo assim os menos dúcteis.

Os sistemas de classificação de aços especiais para a construção mecânica SAE/AISI (normas americanas) e ABNT (normas brasileiras), utilizam em geral quatro algarismos na forma ABXX onde A e B são os números que identificam os principais elementos de liga

presentes no aço e seus teores, dados em porcentagem em peso (Machado et. al., 2011). O quadro 1 apresenta as designações atribuídas aos tipos de aço para construção mecânica:

Quadro 1 – Sistemas SAE e AISI/SAE/UNS de classificação de aços.

Designação		Tipos de Aço
AISI-SAE	UNS	
10XX	G10XXX	Aços-carbono comuns
11XX	G11XXX	Aços de usinagem fácil, com alto S
12XX	G12XXX	Aços de usinagem fácil, com alto P e S
15XX	G15XXX	Aços-Mn com manganês acima de 1%
13XX	G13XXX	Aços-Mn com 1,75% de Mn médio
40XX	G40XXX	Aços-Mo com 0,25% de Mo médio
41XX	G41XXX	Aços-Cr-Mo com 0,4 a 1,1% de Cr e 0,08 a 0,35% de Mo
43XX	G43XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 1,65 a 2 de Ni, 0,4 a 0,9% de Cr e 0,2 a 0,3% de Mo
46XX	G46XXX	Aços-Ni-Mo com 0,7 a 2% de Ni e 0,15 a 0,3% de Mo
47XX	G47XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 1,05% de Ni, 0,45% de Cr e 0,2% de Mo
48XX	G48XXX	Aços-Ni-Mo com 3,25 a 3,75% de Ni e 0,2 a 0,3% de Mo
51XX	G51XXX	Aços-Cr com 0,7 a 1,1% de Cr
E51100	G51986	Aços-cromo (forno elétrico) com 1% de Cr
E52100	G52986	Aços-cromo (forno elétrico) com 1,45% de Cr
61XX	G61XXX	Aços-Cr-V com 0,6 ou 0,95% de Cr e 0,1 ou 0,15% de V mín.
86XX	G86XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 0,55% de Ni, 0,5% de Cr e 0,2% de Mo
87XX	G87XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 0,55% de Ni, 0,5% de Cr e 0,25% de Mo
88XX	G88XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 0,55% de Ni, 0,5% de Cr e 0,3 a 0,4 de Mo
9260	G92XXX	Aços-Si com 1,8% a 2,2% de Si
50BXX	G50XXX	Aços-Cr com 0,2 a 0,6% de Cr e 0,0005 a 0,003% de boro
51B60	G51601	Aços-Cr com 0,8% de Cr e 0,0005 a 0,003 de boro
81B45	G81451	Aços-Ni-Cr-Mo com 0,3% de Ni, 0,45% de Cr, 0,12% Mo e 0,0005 a 0,003% de boro
94BXX	G94XXX	Aços-Ni-Cr-Mo com 0,45% de Ni, 0,4% de Cr, 0,12% Mo e 0,0005 a 0,003% de boro

Fonte: Machado et. al. (2011).

3.1.1 Aço AISI 52100

Como pode ser observado em sua composição química presente no quadro 2, o aço AISI 52100 é considerado um aço hipereutetóide de baixa liga contendo cromo.

Quadro 2 – Composição Química nominal do aço AISI 52100

Material	Elementos								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	P
SAE 52100	0,98-1,03	0,38-0,41	0,16-0,32	1,39-1,43	0,07	0,02	0,12	0,017-0,06	0,019-0,12

Fonte: Adaptado de Swahn et. al. (1976).

O aço SAE 52100 apresenta múltiplas propriedades que o tornam convenientes à fabricação de ferramentas, rolamentos endurecidos, componentes de precisão e matrizes. Além disso seu custo é relativamente baixo e ele possui alta resistência a fadiga, alta temperabilidade e dureza, boa resistência à compressão / tração, assim como um moderado nível de inclusões de sólidos e gases (LUZGINOVA, 2008).

De acordo com BESWICK (1987), a composição química deste aço é avaliada como conveniente para aplicações na construção de rolamentos por conta de seu desempenho em relação a usinabilidade, confiabilidade do produto final, custo, vida em fadiga por contato de rolamento e desempenho estrutural.

Ainda, segundo RAMOS (2010), o aço AISI 51200 é largamente aplicado na fabricação de rolamentos em virtude da obtenção de uma microestrutura martensítica com uma distribuição fina de carbonetos esferoidizados. Como característica desse tipo de microestrutura está a sua elevada resistência mecânica e dureza superior a 60 HRC, propriedades as quais são necessárias na fabricação desse tipo de peça.

O cromo tem uma participação ativa na estabilização e no tamanho dos carbonetos dispersos na matriz martensítica revenida, os quais são necessários a fim de atingir propriedades de dureza e resistência ao desgaste que são muito necessárias no uso em rolamentos.

3.2 USINAGEM

As operações de usinagem são entendidas como aquelas que conferem à peça uma dimensão, forma ou acabamento, ou ainda uma combinação desses três itens, e tem como consequência a produção de cavaco (FERRARESI, 1970).

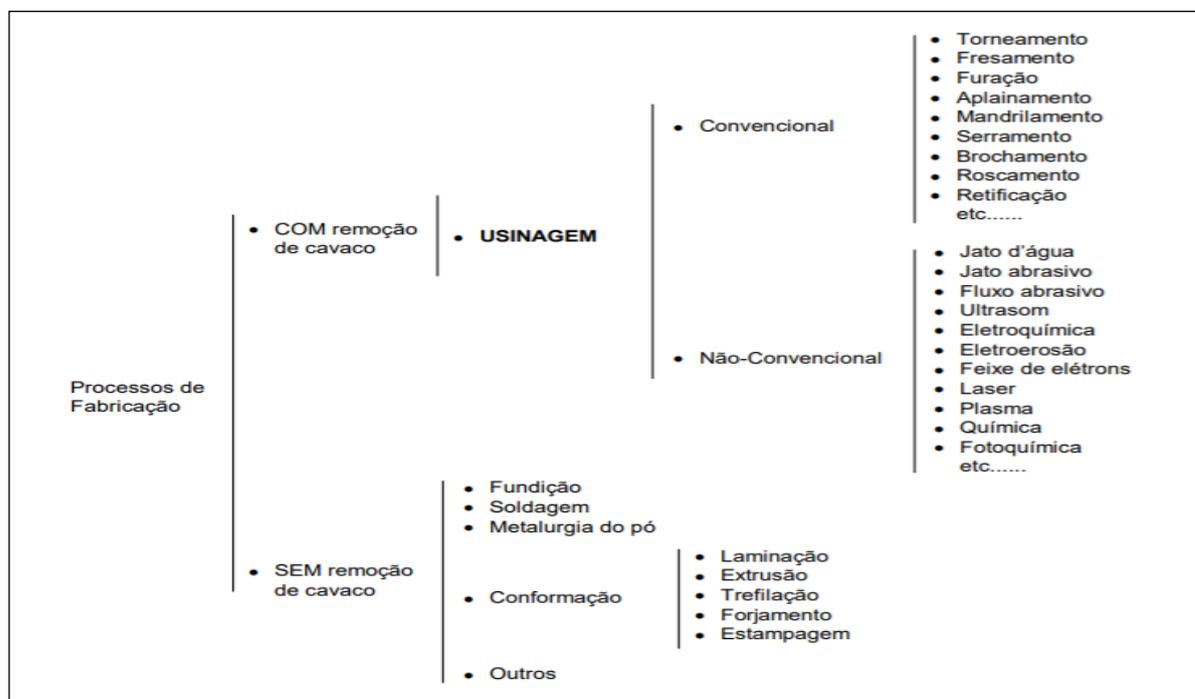
De acordo com TRENT e WRIGHT (2000), a usinagem é o processo de fabricação mais empregado no mundo, este é responsável por transformar em cavaco cerca de 10% de toda a produção de metais e tem a sua importância social, empregando muitas pessoas. Porém, apesar de sua relativa simplicidade, o processo de usinagem se mostra complexo em

consequência da imprevisibilidade das condições ideais de corte. A importância das condições ideais de corte se deve à sua capacidade de proporcionar a fabricação de peças dentro de uma forma, tamanho e acabamento dentro dos parâmetros especificados e tudo isso ao menor custo possível.

As condições ideais de corte podem ser definidas como: o material e a geometria das ferramentas de corte, a velocidade de corte e avanço adequadas e o fluido de corte adequado (MACHADO et al., 2011)

Na figura 1 é possível observar as classificações dos processos de fabricação, com foco nos diferentes tipos de usinagem.

Figura 1 – Classificação dos processos de fabricação



Fonte: Machado et. al. (2011).

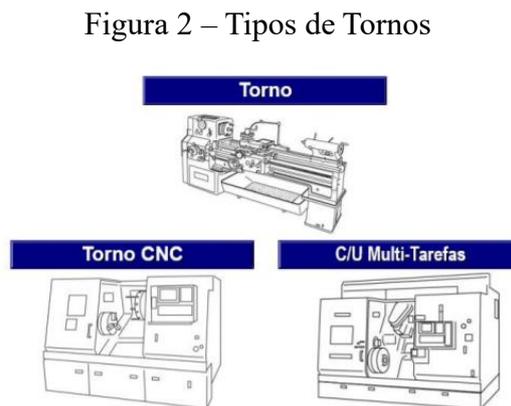
Com o aumento da precisão dos equipamentos, o torneamento se mostrou uma opção muito viável em relação à retífica, uma vez que ele oferece um melhor custo-benefício, o qual se deve a um investimento menor com máquina e ferramentas. Ademais, o torneamento provê uma peça final com resistência à fadiga igual ou até melhor do que aquela oferecida pela retífica (CHAUDHARI; HASHIMOTO, 2016).

3.2.1 Torneamento

O torneamento é conhecido como uma das mais antigas operações e sua principal característica é a rotação da peça e o deslocamento do ferramental. Uma placa com castanhas é utilizada para fixação da peça e um castelo ou torre para a fixação da ferramenta. É possível se obter cilindros ou geometrias complexas através do movimento com velocidade constante que a ferramenta executa sobre a peça (EDWARDS, 1993).

Há três características notáveis no torneamento e que não ocorrem na maior parte dos outros processos de usinagem. Elas são: o corte normalmente contínuo; a descrição do corte em coordenadas cilíndricas; ocorre, de maneira simultânea, o movimento da peça e da ferramenta (AMORIM, 2002).

Na figura 2 é possível observar alguns tipos de tornos.

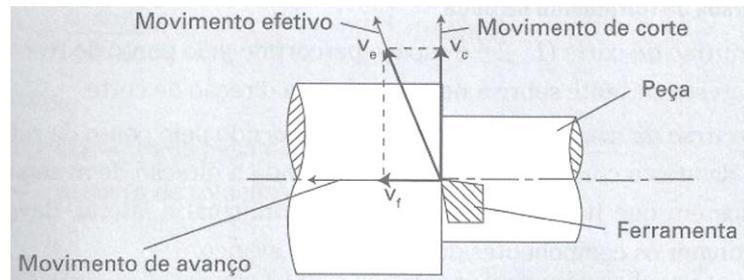


Fonte: Adaptado Mitsubishi (2006).

3.2.1.1 Parâmetros de corte para o processo de torneamento

De acordo com Machado et al (2011), no processo de usinagem os movimentos são relativos entre a peça e a aresta cortante, isto é, a peça está parada. Os movimentos podem ser classificados entre aqueles que causam diretamente a saída do cavaco (movimento de corte, movimento de avanço e movimento efetivo) e aqueles que não fazem parte diretamente da formação do cavaco (movimento de aproximação, movimento de ajuste, movimento de correção e movimento de recuo). Os movimentos que causam diretamente a saída do cavaco estão demonstrados na figura 3.

Figura 3 – Direção dos movimentos que causam diretamente a saída do cavaco



Fonte: Machado et. al. (2011).

Segundo Davim (2001), os principais parâmetros de corte no torneamento são: avanço, velocidade de corte e profundidade de corte.

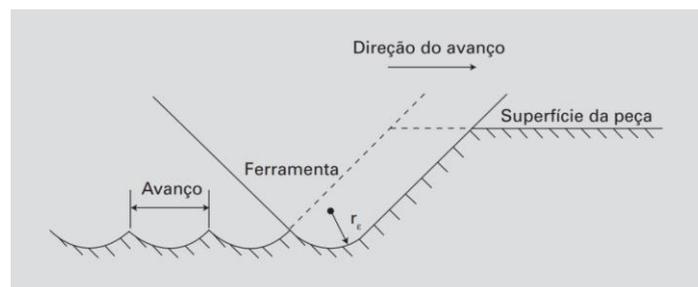
A velocidade de corte se trata da velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta ao redor da peça. Como ela possui uma grande influência no desgaste da ferramenta, é necessário alguns cuidados ao defini-la. Outro ponto importante é que a temperatura da peça usinada tem grande dependência da velocidade de corte (DINIZ et. al., 2013). Ela é calculada através da equação (1):

$$V_c = \frac{\pi \times d \times \eta}{1000} \quad (1)$$

Na qual: V_c = velocidade de corte (m/min); d = diâmetro da peça (mm) e η = rotação (rpm).

O avanço se trata do deslocamento que a ferramenta executa a cada rotação da peça. Ele se expressa em milímetros por rotação. O avanço é, geralmente, o primeiro parâmetro a ser selecionado, ele influencia diretamente no acabamento da peça, uma vez que ele deixa marcas na superfície da peça a ser usinada (THIELE e MELKOTE, 1999). É possível observar a influência do avanço na figura 4.

Figura 4 – Influência do avanço no acabamento superficial da peça usinada



Fonte: Machado et. al. (2011).

O acabamento superficial da peça está intimamente ligado à distância entre os picos. Logo, quando se aumenta o avanço, conseqüentemente a distância entre os picos se torna maior, o que prejudica o acabamento superficial da peça usinada (EDWARDS, 1993).

De acordo com Diniz et al. (2013), a velocidade de avanço é definida como o produto do avanço pela rotação da ferramenta e é calculada através da equação (2):

$$V_f = f.n = \frac{1000.V_c}{\pi.d} . f \quad (2)$$

Na qual: f = avanço (mm/volta) e V_f = velocidade de avanço (mm/min).

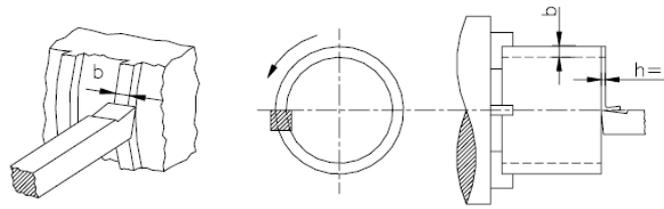
Outro parâmetro importante na usinagem é a profundidade de usinagem ou de corte. A profundidade de usinagem é aquela relativa à penetração da ferramenta em relação à peça, ela é medida perpendicularmente ao plano de trabalho (DINIZ et al., 2013)

3.2.2 Formação de Cavaco

Segundo Amorim (2002), o principal ponto em comum entre os diversos processos de usinagem é o cavaco, uma vez que ele é o subproduto final em todos eles. A variação do cavaco se dá em tipo, forma e extensão e depende de cada operação de usinagem. Sendo assim, o resultado do cavaco é produto de todas as variáveis envolvidas no processo.

Uma forma de estudar e entender a formação do cavaco é através de simplificações em relação ao processo de fabricação. Isso é obtido através do corte ortogonal. Nele a aresta cortante é reta, normal à direção de corte e normal à direção do avanço, simplificando a formação do cavaco que pode ser considerado um fenômeno bidimensional (MACHADO et al., 2011). A figura 5 ilustra exemplos de usinagens que são próximas do corte ortogonal no torneamento.

Figura 5 – Exemplos de Corte Ortogonal



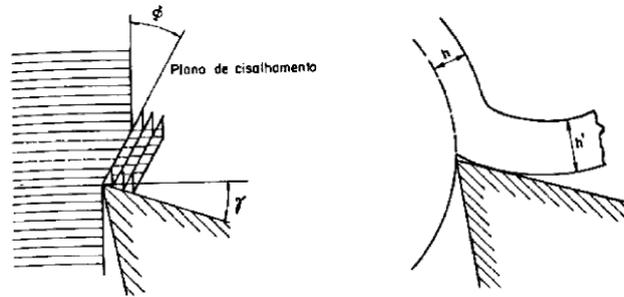
Fonte: Machado et. al. (2011).

Conforme Diniz et al. (2013), de maneira geral, a formação do cavaco em condições normais e com ferramentas de metal duro ou aço-rápido se dá da seguinte forma:

- 1) Uma diminuta parcela do material, que ainda está conectada à peça, sofre deformações elástica e plástica ao longo do processo de usinagem contra a superfície de saída da ferramenta;
- 2) A deformação plástica sofre um aumento gradual, até o ponto em que as tensões se tornam grandes o suficiente para que comece um deslizamento entre a parcela do material recalcado e a peça;
- 3) Assim que há a penetração da ferramenta, acontece a ruptura parcial ou completa do cavaco, acompanhando o plano de cisalhamento. A forma do cavaco é influenciada pela ductilidade do material e as condições do processo. Na usinagem de materiais dúcteis, as deformações ocorrem nas proximidades da aresta cortante, o que gera cavacos mais longos, conhecidos como cavacos contínuos. Já na usinagem de materiais frágeis, os quais apresentam uma zona plástica bem menor, ocorre a descontinuidade total do cavaco em pequenas medidas, acarretando o cavaco de cisalhamento.
- 4) O escorregamento do cavaco que foi formado sobre a superfície de saída da ferramenta se dá através do movimento relativo entre a ferramenta e a peça. Nesse meio tempo, uma nova parcela do cavaco está em processo de formação, repetindo assim todo o ciclo.

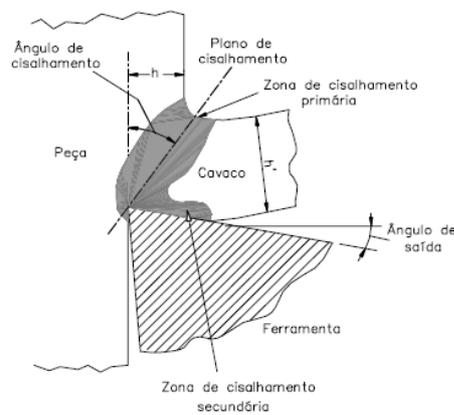
A figura 6 mostra de forma esquemática a formação do cavaco e a figura 7 as zonas de cisalhamento.

Figura 6 – Ilustração da formação do cavaco e o processo e de recalque dele



Fonte: Adaptado Ferraresi (1970).

Figura 7 – Esquema com as zonas de cisalhamento primária e secundária



Fonte: Machado et. al. (2011).

3.2.2.1 Tipos e formas de cavaco

O cavaco gerado pode ser, ao mesmo tempo, indicativo e causa de problemas no processo de usinagem. Sendo assim, simultaneamente, um determinado tipo de cavaco pode causar problemas, como por exemplo, danos superficiais ou ocupação excessiva de volume, e sua forma, tamanho e tipo podem ser indicativos de pontos de atenção, que podem ser relativos à qualidade do material usinado e às condições da ferramenta de corte (AMORIM, 2002).

Durante o processo de usinagem é possível observar a formação de um cavaco contínuo, quando o material usinado é dúctil, ou um fluxo de partículas de cavaco quebrado, quando o material usinado é frágil. A quebra do cavaco pode acontecer de forma natural durante a sua formação ou a quebra pode ser induzida através da utilização de um quebra-cavacos (MACHADO et. al., 2011).

De acordo com Ferraresi (1970), uma das principais maneiras de classificação do cavaco é em relação ao seu tipo e forma.

Para Diniz et. al. (2013), os tipos de cavaco são:

a) Cavaco contínuo – É constituído de lamelas justapostas de forma contínua. Não é perceptível a distinção das lamelas. É formado na usinagem de materiais dúcteis, como o aço, no qual o ângulo de saída assume valores altos;

b) Cavaco de cisalhamento – Sua constituição apresenta lamelas justapostas bem distintas.

c) Cavaco de ruptura – É formado através de fragmentos desprendidos da peça usinada. A ação do atrito e a face de contato entre cavaco e superfície de saída da ferramenta são reduzidas, sendo assim, o ângulo de saída assume valores baixos, nulos ou negativos.

Em relação às formas que o cavaco pode assumir, segundo Machado et. al. (2011), ele é classificado em:

- a) Cavaco em fita;
- b) Cavaco helicoidal;
- c) Cavaco espiral;
- d) Cavaco em lascas ou pedaços.

Todavia, a ISO 3685 (1993) apresenta uma classificação mais detalhada, de acordo com a figura 8.

Figura 8 – Formas de cavaco produzidas durante o processo de usinagem

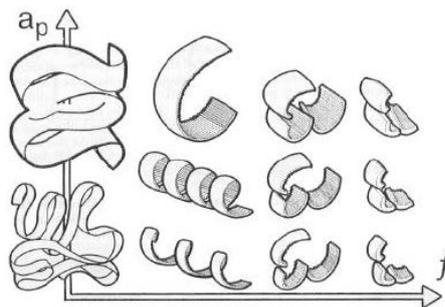
1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco hel. tipo arruela	5- Cavaco hel. cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Salto		
1-3- Emaranhado	2-3- Emaranhado		4-3- Emaranhado	5-3- Emaranhado			

Fonte: ISO 3685 (1993).

O ponto de atenção em relação à segurança são as formas de cavaco em fita, os quais podem causar maiores transtornos e exigem uma atenção redobrada no processo e no manuseio (MACHADO et. al., 2011). Este cavaco pode se enrolar ao torno, causar danos na ferramenta e comprometer o acabamento superficial. Fora a dificuldade de manusear e o fato de que ele ocupa um espaço muito maior se comparado ao cavaco curto (DINIZ et. al., 2013).

A forma do cavaco depende alguns fatores, como parâmetro de corte, superfície de saída da ferramenta e ela também pode ser alterada através do uso de elementos especiais, como o quebra-cavaco, na superfície de saída. A dependência dos fatores pode ser observada na figura 9, de forma geral, quando há o aumento da velocidade de corte e do ângulo de saída a forma do cavaco tende a se mover para a esquerda no gráfico, ao passo que o avanço move a forma do cavaco para a direita no mesmo gráfico (figura 9) (AMORIM, 2002).

Figura 9 – Influência do avanço e da profundidade de corte da forma do cavaco



Fonte: Machado et. al. (2011).

3.2.3 Fluidos de Corte

Para Machado et. al. (2011), o uso de fluidos de corte na usinagem é uma opção que pode trazer benefícios quando escolhido e aplicado apropriadamente. A escolha de um fluido de corte deve incidir naquele que possui a composição e as propriedades químicas mais adequadas ao processo de corte específico.

O fluido de corte tem como função introduzir uma melhora no processo de usinagem. Essa melhora pode ser de caráter funcional, facilitando o processo, ou de caráter econômico. Entre as melhorias de caráter funcional estão a redução do atrito entre a ferramenta e o cavaco, a repulsão do cavaco da região de corte, refrigeração e acabamento superficial superior. Já as melhorias de caráter econômico implicam em redução do consumo de energia e do custo da ferramenta, além de evitar a corrosão da peça usinada (FERRARESI, 1970).

De acordo com Machado et. al. (2001) existem diversas maneiras de classificar os fluídos de corte e não há um padrão definido para sua classificação. Entretanto, é comumente utilizada uma classificação que os reúne da seguinte forma: Gasosos, líquidos e sólidos.

Em contrapartida, o uso de fluídos de corte pode causar diversos inconvenientes, tais quais: dificuldade e aumento de custo na reciclagem, poluição, problemas de saúde nos operadores. Por essa razão é importante levar em conta todos os fatores antes da escolha do uso ou não dos fluídos de corte.

3.2.3.1 Usinagem a seco

Em concordância com Sreejith; Ngoi (2000), os problemas relacionados à utilização de fluídos de corte estão sendo solucionados através da usinagem a seco (ou corte a seco), a qual é viável devido a inovações tecnológicas. Dentre as vantagens da usinagem a seco estão: vantagens ambientais, já que o processo não gera poluentes para a água ou atmosfera, além de facilitar a reciclagem dos cavacos, que se apresentam livres de resíduos; e vantagens para a saúde dos operadores.

Todavia, quando não se faz mais o uso de fluídos de corte, há um aumento do atrito na interface ferramenta-peça e cavaco-ferramenta, logo observa-se o aumento da temperatura. Devido às maiores cargas térmicas, as quais a ferramenta é submetida, verifica-se maiores níveis de abrasão, difusão e oxidação da mesma, o que, conseqüentemente, reduz sua vida. Ademais, ao estar em contato com maiores temperaturas, originadas do corte, a peça e a máquina-ferramenta estão propensas à dilatação, o que pode dificultar a obtenção de tolerâncias justas e, em casos específicos, pode acarretar problemas com a estrutura superficial da peça (KLOCKE; EISENBLATTER, 1997).

Diniz et. al. (2013), descrevem que para a realização do corte a seco sem prejuízo na vida da ferramenta ou perda de qualidade da peça usinada, é indispensável o uso de condições adequadas e de ferramentas que apresentam um coeficiente de atrito baixo, alta dureza a quente e estabilidade química considerável. No que concerne ao material da ferramenta, metal duro com camadas duras de cobertura TiCN (carbonitreto de titânio), TiAlN (nitreto de titânio-alumínio), AlTiN (nitreto de alumínio-titânio) e diamante são bons exemplos de ferramentas que podem ser usadas na usinagem a seco. Já em relação às condições de corte, é recomendado aumentar o avanço e diminuir a velocidade de corte, de forma a manter o volume de cavaco produzido e o calor gerado por unidade de tempo (DINIZ et al., 2013).

3.2.4 Materiais para ferramentas de corte

Segundo Mitsubish (2007), as primeiras ferramentas utilizadas eram simples e feitas de pedra e pedaços de madeira. Com o uso, percebeu-se que poderiam aprimorá-las através de modelagens, tornando-as mais eficientes. Como o material ser cortado se tornou mais duro que o material da ferramenta, se tornou necessária a substituição da pedra e da madeira por bronze e ferro. E a história dos materiais de ferramentas se tornou cíclica, a cada novo material mais duro era necessário encontrar um outro superior para a ferramenta de corte.

A partir de 1898 quando as ferramentas de Aço Rápido (HSS – High Speed Steel) foram disponibilizadas no mercado, muitas empresas começaram o processo de estudo de novos materiais para ferramentas de usinagem. Foi então que na década de 1920 o alemão, Dr. Schroter, desenvolveu o “metal duro” (WC e Co) que se mostrou um material muito mais duro que o aço rápido (COSTA, 2016).

De acordo com Machado et al. (2004), as pesquisas em busca de novos materiais não cessaram, por isso, ao longo dos anos, surgiram os revestimentos, o Cermet, o PCD, o CBN e o diamante sinterizado.

É possível ver um panorama histórico do desenvolvimento dos materiais para ferramentas através da figura 10.

Figura 10 – Histórico do desenvolvimento de materiais para ferramentas

	1898	1923	1926	1928	1947	1960	1969	1970	1972	1975	1980
Ferro	Aço rápido (HSS)	Metal duro	Friedrich Krupp, na Alemanha, lançou com sucesso produtos de metal duro	General Electric (GE) nos E.U.A., lançou com sucesso produtos de metal duro	Cerâmica (com base Al ₂ O ₃)	Cermet (com base TiC)	Cerâmica (com base Al ₂ O ₃ -TiC) Metal duro com cobertura (TiC-Al ₂ O ₃ , multi-camadas)	Aço rápido sinterizado (HSS) Cermet (com base TiC-TiN)	CBN Sinterizado	Diamante sinterizado	Cerâmica (com base Si ₃ N ₄) (com base Al ₂ O ₃ -TiC)

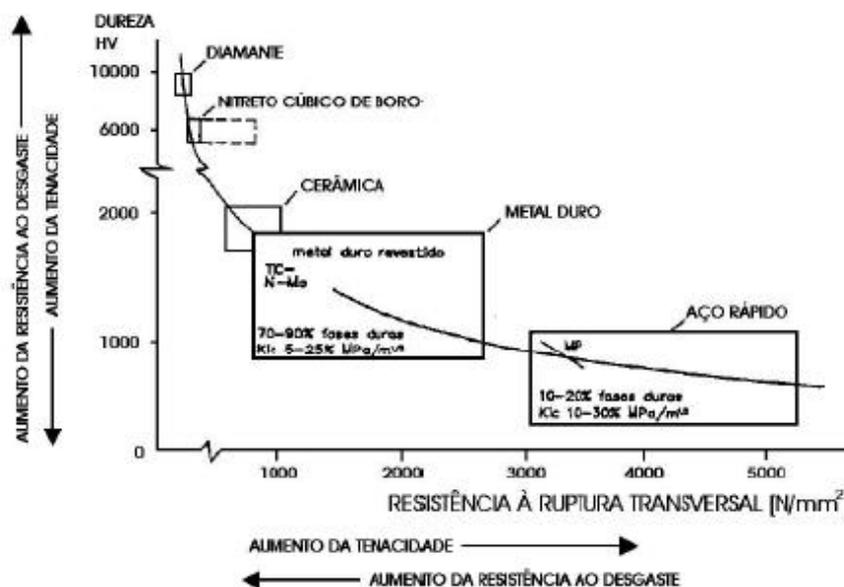
Fonte: Adaptado de Mitsubishi (2007).

Apesar de não haver uma classificação geral de materiais para ferramentas, em razão de sua ordem cronológica de desenvolvimento e com baseado em suas características químicas, é possível agrupá-los da seguinte forma: aços carbono (sem elementos de liga ou

com baixos teores de liga), aços rápidos, ligas fundidas, metal duro e materiais cerâmicos. Sendo os mais utilizados os aços rápidos e o metal duro (FERRARESI, 1970).

Para Amorim (2002), a maior dificuldade no desenvolvimento das ferramentas é balancear a dureza e tenacidade, uma vez que estas são propriedades de importância elevada para o desempenho da ferramenta de corte e que raramente são encontradas em um mesmo material (como pode ser observado na figura 11). Nos dias atuais, é possível encontrar boas combinações de dureza e tenacidade tanto em materiais puros como nos revestidos. As ferramentas revestidas têm a função de encontrar um equilíbrio entre as propriedades necessárias através do uso de um material base (que é responsável pela tenacidade e uma parte da dureza) e um revestimento (que apresenta alta dureza, resistência à abrasão e inércia química).

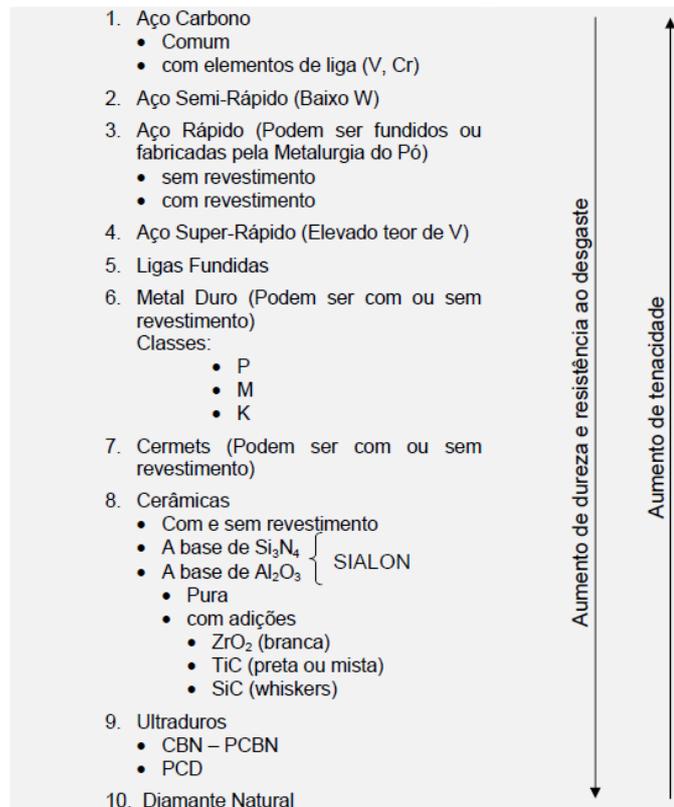
Figura 11 – Diagrama de dureza-tenacidade dos materiais de ferramentas de corte



Fonte: Sandvik (2020).

A figura 12 mostra a lista de materiais para ferramentas de corte existentes no mercado. A lista está em ordem crescente de dureza (ou resistência ao desgaste) e em ordem decrescente em relação à tenacidade (MACHADO, et al., 2004).

Figura 12 – Lista de materiais para ferramentas de corte



Fonte: Machado et. at. (2004).

3.2.4.1 Metal duro

Com o advento dos metais duros as velocidades de corte tiveram um salto de aproximadamente uma ordem de grandeza (de 35m/min para 250-300 m/min). O surgimento do metal duro se deu na década de 20, quando o alemão, Schroter, conseguiu produzir o WC em pó pela primeira vez em laboratório. Foi a mistura desse pó com o cobalto, também em pó, que permitiu o aparecimento do metal duro (MACHADO et. al., 2004).

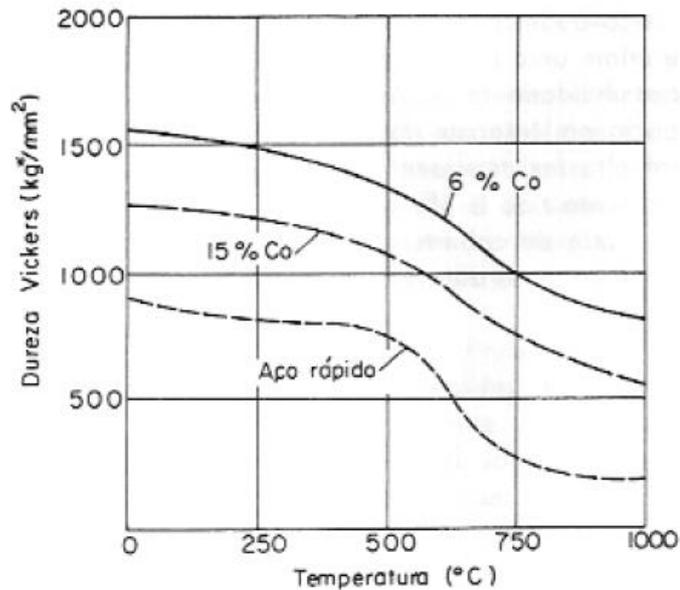
De acordo com Ferraresi (1970), o metal duro é formado por dois constituintes:

- Um carboneto extremamente duro e com elevada resistência ao desgaste. São eles que conferem a dureza à temperatura e a resistência ao desgaste. Trata-se do carboneto de tungstênio puro ou associado a carbonetos de titânio, tântalo, nióbio ou outros.

- Um elemento aglomerante, que tem a função de aglomerar as partículas duras dos carbonetos e é o responsável pela tenacidade do material. Eles são metais do grupo do ferro, geralmente o cobalto.

A figura 13 exibe a influência da temperatura e da percentagem de cobalto na dureza, sendo que duas curvas são para o metal duro com diferentes teores de cobalto e a terceira é relativa ao aço rápido, como critério de comparação. Observa-se que a diminuição da quantidade de cobalto acarreta um aumento da dureza à quente.

Figura 13 – Influência da temperatura e da percentagem de cobalto na dureza



Fonte: Diniz et. al. (2013).

Atualmente, o metal duro sem recobrimento tem perdido o seu espaço no mercado para o metal duro com recobrimento, sendo que o primeiro tem sido usado apenas na usinagem do alumínio e em algumas operações especiais (DINIZ et. al., 2013).

3.2.4.2 Metal duro com recobrimento

O uso de recobrimentos nas ferramentas de metal duro ganhou uma importância grande pois mostrou-se que o mesmo pode garantir um desempenho superior à ferramenta sem recobrimento, principalmente durante a usinagem de materiais ferrosos (que são a maioria dos utilizados na indústria mecânica). A diminuição do custo também foi um fator que contribuiu para o maior uso dos descobrimentos, o qual foi conquistado através do maior domínio das técnicas de revestimento (MACHADO et. al., 2004).

A principal finalidade das camadas de recobrimento é melhorar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e com a peça, protegendo o núcleo da

pastilha, que mantém as suas propriedades de tenacidade. Aumenta-se assim a vida da ferramenta e diminui-se os esforços de corte. O uso dos recobrimentos foi a alternativa encontrada para combinar tenacidade e resistência ao desgaste e dureza a quente (Diniz et al., 2013).

De acordo com Trent; Wright (2000), entre os processos de aplicação de revestimentos para ferramentas se destacam o CVD e o PVD. A deposição química de vapor (CVD – Chemical Vapour Deposition), ocorre através de reações químicas em temperaturas, normalmente, entre 850 – 1050°C. Já o processo de deposição física de vapor (PVD – Physical Vapour Deposition) acontece por meio de vapores oriundos do interior de fornos a baixa pressão com temperaturas, em geral, entre 400 – 600°C.

Algumas das principais propriedades adquiridas através dos revestimentos são, segundo Santos e Sales (2007):

- Dureza: mediante o uso de revestimentos de elevada dureza, que também suporta elevadas temperaturas, há um aumento da resistência ao desgaste, além uma menor propensão para ocorrer desgaste de cratera.
- Microestrutura e morfologia: o tipo do processo de deposição é decisivo no quesito formação da microestrutura (isto é, tamanho e estrutura dos grãos). Os revestimentos de PVD contribuem para a elevação da dureza uma vez que eles possuem maior densidade de discordância em sua estrutura cristalina.
- Adesividade: no processo CVD, como a nucleação do revestimento ocorre através de interdifusão, para aplicação de revestimentos de diamante é necessário a remoção do cobalto da superfície a fim de garantir a boa adesividade, para tanto é necessário um ataque e tratamento térmico da superfície antes da deposição.
- Condutividade térmica: a fim de garantir o sucesso da usinagem a seco e a altas velocidades é imprescindível que haja um bom comportamento dos revestimentos e das propriedades termo-isolantes, para isso é necessário a baixa condutividade térmica.

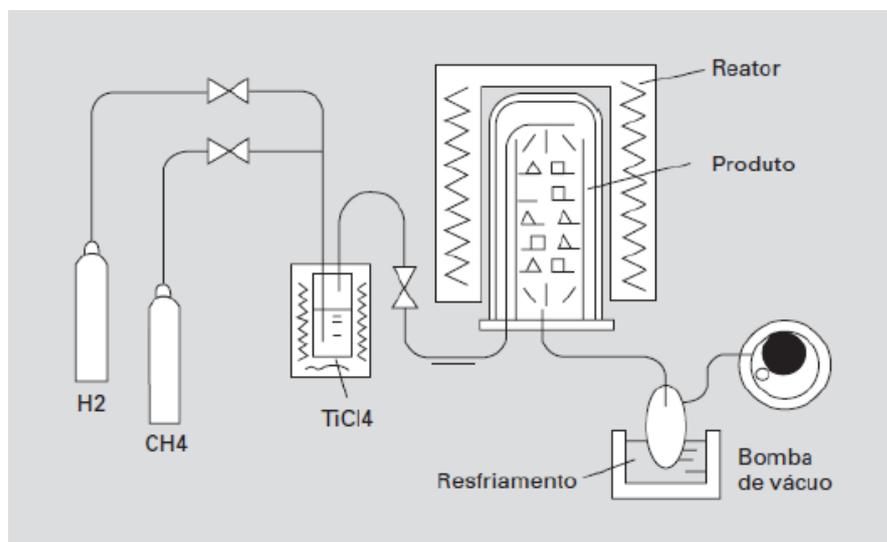
3.2.4.2.1 Processo CVD

O processo CVD (sigla para Chemical Vapor Deposition) ocorre através da aplicação de um material sólido a partir de uma fase gasosa mediante uma reação química que acontece em

um substrato aquecido a fim de formar uma fina película. Uma vantagem desses revestimentos é a sua aplicabilidade a superfícies com formas complexas não planas. Entretanto, o CVD só é viável nos casos em que a temperatura do substrato requerido está dentro dos limites. Comercialmente são utilizados três materiais de revestimentos, são eles: TiC, Al₂O₃ e TiN. Enquanto os dois primeiros fornecem a camada mais quimicamente estável entre o cavaco e a ferramenta, o último oferece o menor atrito na ferramenta (SHAW, 2005).

A figura 14 mostra um diagrama com o esquema do processo CVD.

Figura 14 – Processo de deposição química de vapor



Fonte: Mitsubishi (2005).

A performance geral da usinagem é baseada em uma associação de diversas propriedades, além da classe da ferramenta utilizada e suas características. O bom desempenho na usinagem não pode ser garantido apenas pelo fato de o revestimento oferecer alta resistência e dureza. É necessária uma combinação satisfatória entre o revestimento e o substrato para resultar em uma boa classe de ferramenta (COSTA, 2016).

Usualmente a espessura total das camadas de revestimento varia entre 4µm e 12µm. Se as camadas forem muito espessas podem resultar em uma fragilização da aresta, dessa forma, um número alto de camadas pode se mostrar nocivo à vida da ferramenta. De forma geral, o uso de camadas finas intercaladas entre si se mostrou mais efetiva se comparada ao uso de uma única camada espessa (WERTHEIM et. al., 1982).

No quadro 3 é possível observar propriedades de alguns materiais que formam as camadas de revestimento.

Quadro 3 – Propriedades de camadas de revestimento

	Dureza	Energia de Formação Livre	Condutividade Térmica ^{*3}	Coefficiente de Choque Térmico ^{*1}	Propriedade de Oxidação ^{*2}	Solubilidade no Fe
	Resistência ao Desgaste do Flanco	Resistência ao Desgaste de Craterização	Deformação Plástica e Resistência à Fadiga Térmica	Resistência ao Choque Térmico	Resistência ao Entalhe	Resistência à Soldagem
	(HV)	(J / g*Pa)	(W / mK)	-	(°C)	(%)
WC	1780	-0,4	121	268	500	7
TiC	3200	-1,2	24	19	1100	< 0,5
TiN	2050	-2,0	19	-	1200	0
Al ₂ O ₃	2100	-4,0	29	-	Estável	0

Fonte: Mitsubishi (2006).

*1 = Impacto térmico => (condutividade térmica X resistência à tração) / (coeficiente de expansão x módulo de Young);

*2 = A temperatura máxima apresentada para a resistência à oxidação;

*3 = Temperatura ambiente.

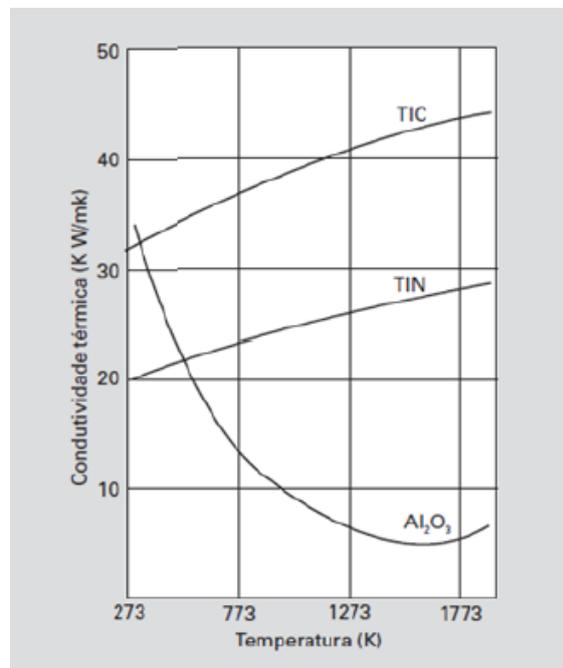
As principais características das principais camadas de revestimento, segundo Diniz et al. (2013), são:

- **Carboneto de titânio (TiC)** – apresenta uma alta resistência ao desgaste por abrasão, também atua como elemento responsável pela promoção da adesão das camadas de cobertura com o metal duro do núcleo. Por essa razão, o TiC ou atua como camada única ou está por baixo das demais camadas. Possui a maior dureza entre os materiais utilizados como cobertura de metal duro. Suas outras características notáveis são: a baixa tendência de soldagem com o material da peça e o baixo coeficiente de dilatação térmica.
- **Óxido de alumínio (Al₂O₃)** – essa camada, devido ao fato de ser formada por um material cerâmico refratário, garante a estabilidade térmica essencial em temperaturas elevadas, além de possuir alta resistência ao desgaste por abrasão e alta resistência a ataques químicos e à oxidação. Entretanto, ela possui uma baixa resistência a choques térmicos e mecânicos.
- **Nitreto de titânio (TiN)** – é o responsável pela redução do coeficiente de atrito entre a pastilha e o cavaco. Possui também uma menor tendência à difusão com aços se comparada ao carboneto de titânio.

- **Carbonitreto de titânio (TiCN)** - Suas características de resistência ao desgaste, dureza e capacidade de adesão são semelhantes às do TiC, tendo como diferencial o seu menor coeficiente de atrito. Uma de suas vantagens é a sua estrutura multicamadas que evita que as trincas formadas na superfície se propaguem até o substrato.

É possível observar a influência da temperatura na condutividade térmica dos materiais utilizados como revestimento através da figura 15.

Figura 15 – Influência da temperatura na condutividade térmica dos revestimentos TiC, TiN e Al_2O_3



Fonte: Wertheim et. al. (1982).

3.2.4.2.2 *Processo PVD*

O processo de deposição física PVD (sigla para Physical Vapor Deposition) surgiu na década de 1970, como uma forma deposição de TiN sobre ferramentas feitas de aço rápido. Foi só após dez anos que se adaptou o processo para revestir também as ferramentas de metal duro. Sua principal característica é a temperatura por volta de 500°C, a qual traz benefícios como (SANTOS; SALES, 2007):

- Viabilidade de revestimento de substratos de aços-rápidos;
- Possibilidade de obtenção de revestimentos com granulometria mais fina;
- Exequibilidade de revestir cantos vivos.

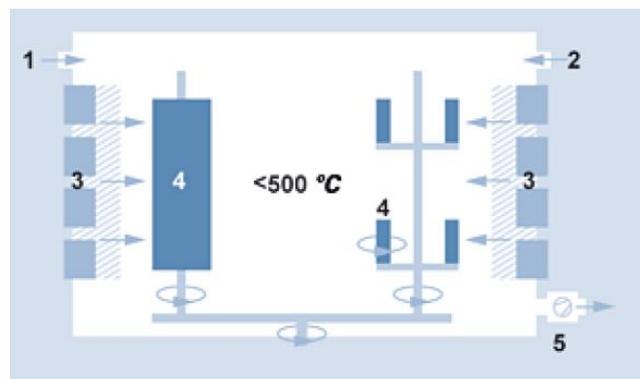
Para Oerlikon (2010), neste processo, o material de revestimento de sólido de grande pureza (como titânio, cromo e alumínio) pode ser bombardeado com íons ou evaporado pelo calor. Enquanto isso, é introduzido um gás reativo (como nitrogênio ou algum gás que possua carbono), formando um composto com o vapor metálico que se acumula nas ferramentas ou nos componentes em forma de um revestimento fino e altamente aderente.

O PVD pode ocorrer por evaporação, *sputtering* ou revestimento iônico. A evaporação é realizada sob vácuo. A partir de uma fonte aquecida, os átomos ou moléculas vaporizam e alcançam o substrato sem que haja risco de colisão com as moléculas restantes na câmara de vácuo. O vácuo é o agente que evita as colisões e a contaminação causada pelas moléculas residuais. A deposição por evaporação é considerada o processo PVD mais eficiente em termos energéticos (SHAW, 2005).

A figura 16 ilustra o processo de evaporação por arco. Na qual os itens numerados representam:

- 1 – Argônio;
- 2 – Gás reativo;
- 3 – Fonte do arco;
- 4 – Componentes;
- 5 – Bomba de vácuo;

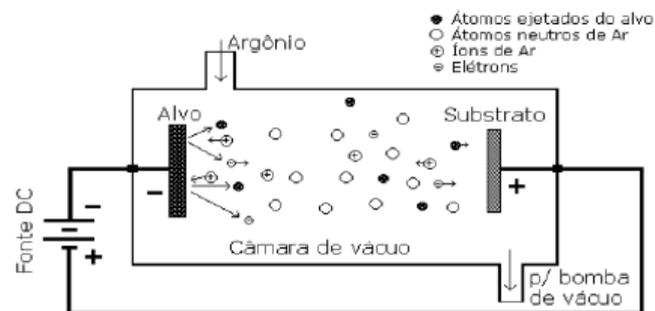
Figura 16 – Evaporação por arco



Fonte: Oerlikon (2010).

O processo de PVD por *sputtering* (ver figura 17), também chamado de diodo de corrente contínua, é constituído por uma câmara de vácuo onde ficam dois eletrodos que estão ligados a uma fonte de alta tensão DC, sendo que, o cátodo é o alvo e o ânodo, o substrato a ser recoberto. Argônio, ou outro gás inerte, é introduzido na câmara a uma pressão estipulada. A ionização no gás acontece quando se aplica uma diferença de potencial entre os eletrodos. Os íons positivos são acelerados em direção ao alvo e tem capacidade de arrancar átomos do material. Os átomos são então ejetados por todas as regiões e, uma parte deles, alcança o substrato, onde, ao condensarem, formam um filme fino (FONTANA, 1997).

Figura 17 – Ilustração de um *sputtering* convencional



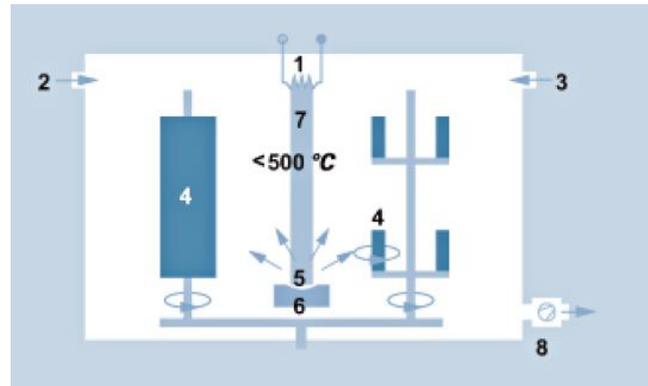
Fonte: Fontana (1997).

O processo de íons, por sua vez, emprega a evaporação por feixe eletrônico reativo. O componente metálico do material revestido (como o titânio ou o cromo) é evaporação por meio de um arco de baixa tensão (OERLIKON, 2010).

O esquema da figura 18 mostra o processo de íons e os números representam:

- 1 – Fonte de feixe eletrônico;
- 2 – Argônio;
- 3 – Gás reativo;
- 4 – Componentes;
- 5 – Material de revestimento;
- 6 – Cadinho;
- 7 – Descarga por arco de baixa tensão;
- 8 – Bomba de vácuo.

Figura 18 – Esquema do processo de íons



Fonte: Oerlikon (2010).

TiN (nitreto de titânio), (Al, Ti)N (nitreto de alumínio e titânio), (Al, Ti, Si)N (nitreto de titânio, alumínio e silício), CrN (nitreto de cromo) e carbono amorfo duro são os materiais mais utilizados no método de revestimento PVD. Cada material apresenta suas propriedades individuais específicas, eles podem ser utilizados em camadas únicas ou múltiplas, dependendo da aplicação desejada (MITSUBISHI, 2006). O quadro 4 mostra algumas dessas propriedades:

Quadro 4 – Propriedades dos materiais utilizados no processo PVD

	Dureza	Temperatura de oxidação
	Resistência ao desgaste	Resistência ao entalhe e à craterização
	(HV)	($^\circ\text{C}$)
TiN	1900	620
(Al, Ti)N	2800	840
(Al, Ti, Si)N	3200	1100
CrN	2000	-
Substrato	1600	-

Fonte: Adaptado de Mitshubishi (2006).

As características de algumas das principais camadas de revestimento são:

- **Nitreto de Cromo (CrN):** se mostra muito eficiente como revestimento para ligas de alumínio, ligas de cobre e aços de baixa liga. Além disso é uma alternativa viável para as ligas de titânio e níquel. Ele tem uma tendência baixa de formação de arestas postiças (KANYANTA et. Al., 2014).

- **Nitreto de Titânio, Alumínio e Silício (TiSiAlN):** Sua estabilidade térmica é maior se comparado ao (Al, Ti)N e tem sua principal utilização nos casos onde é necessário uma aresta de corte mais positiva. Esse revestimento é comumente aplicado em usinagem de materiais endurecidos, principalmente no fresamento (COSTA, 2016).
- **Nitreto de Titânio-Alumínio (TiAlN):** apresenta uma alta resistência a oxidação e alta resistência química. Ele também possui uma condutividade térmica baixa, o que fornece uma proteção às arestas de corte e permite maior remoção de calor pelos cavacos. Apresenta alta dureza a frio e a quente. É, geralmente, utilizado na usinagem de materiais abrasivos e é muito viável em processos a seco (SANTOS;SALES, 2007).

TiN como revestimento no PVD mantêm as características do processo CVD, comentado anteriormente.

No quadro 5 é possível ter uma visão geral comparada das principais propriedades de ferramentas revestidas pelos processos PVD e CVD (MACHADO et al., 2004).

Quadro 5 – Comparação de ferramentas revestidas

	CVD – Deposição química de vapor	PVD – Deposição física de vapor
Temperatura de revestimento	Aproximadamente 1.000 °C	Aproximadamente 500 °C
Tenacidade	Reduzida	Não é afetada
Aresta de corte	Arredondamento requerido	Pode ser quina viva
Espessura do revestimento	Até 12 µm	Até 4 µm
Camadas	Multicamadas TiC - TiN, TiN - TiCN - TiN, TiC - Al ₂ O ₃	TiN, TiCN, TiAlN
Principais aplicações	Torneamento e madrilamento	Fresamento, roscamento e furação
Vantagens	Maior resistência ao desgaste Maior resistência à craterização Grande vida da ferramenta	Substitui ferramentas sem revestimento: com mesma tenacidade, mesma configuração de aresta e mesma precisão Reduz APC Maior vida na ferramenta

Fonte: Machado et. al. (2004).

É possível notar que o processo PVD assegura que a tenacidade do substrato não seja afetada, enquanto no processo CVD ela é diminuída, o que causa impedimentos no uso de

ferramentas revestidas pelo processo CVD em cortes interrompidos. Essa redução de tencidade é causada pela tensão residual de tração deixada pelo método CVD, comparada ao processo PVD, no qual a tensão residual é de compressão, igual à conseguida no substrato (QUINTO et al., 1998).

3.3 DESGASTE E AVARIA DE FERRAMENTA

De acordo com Ferraresi (2018), avaria é considerada toda quebra, trinca, sulcos distribuídos em forma de pente e deformações plásticas, que ocorrem à ferramenta durante o processo de usinagem. Trent; Wright (2000), por outro lado consideram a deformação plástica como um fenômeno pelo qual uma ferramenta de corte perde sua eficácia na usinagem, e não um mecanismo de desgaste como Ferraresi e outros autores.

Por mais dura e resistente ao desgaste que a ferramenta de corte seja, acontecerá um processo de desgaste na mesma e, por isso, precisará ser substituída (MACHADO et al., 2015).

As definições e características de cada fenômeno são:

- **Avaria:** em geral, acontece de forma repentina e não esperada, é causado por quebras, lascamentos ou trincas da aresta de corte, sendo que os dois primeiros levam à total destruição ou à perda de um pedaço considerável da aresta de corte. A quebra é mais comum em ferramentas compostas de um material com baixa tenacidade. O lascamento, apesar de também depender da tenacidade do material, pode acontecer até nas ferramentas de aço rápido (SANTOS, 2004). A trinca é responsável por promover a abertura de fendas no corpo da ferramenta de corte, essas fendas têm o risco de se transformarem em sulcos ou causarem um posterior lascamento ou, até mesmo, quebras. Elas são frequentemente encontradas em ferramentas de metal duro e cermets (MACHADO et al., 2015).

- **Desgastes:** originados, em sua maior parte, pelo atrito entre o cavaco e a ferramenta e entre a ferramenta e a peça. Alguns dos fatores que intervêm nos desgastes são: cisalhamento de microsoldas, abrasão mecânica, difusão intermetálica e oxidação. Os desgastes estão relacionados também à temperatura de corte e, conseqüentemente, às velocidades de corte (DINIZ et al., 2010). A norma ISO 3685 (1993) tem como definição de desgaste “mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material”.

- **Deformação Plástica:** trata-se de uma modificação na geometria da aresta de corte através de deslocamento de material. Isso ocorre, principalmente, em função das altas tensões que atuam nas ferramentas de corte, causando o cisalhamento. Esse fenômeno é mais provável de acontecer em ferramentas com maior tenacidade e baixa resistência ao cisalhamento, como aço rápido, ligas fundidas e metal duro.

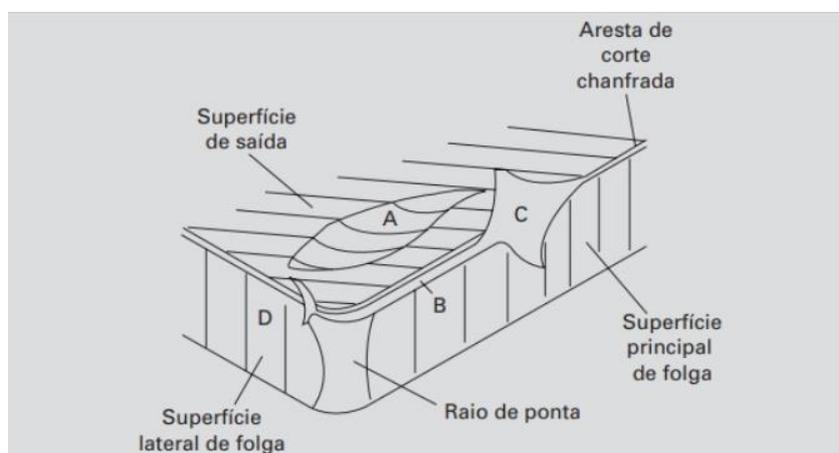
De maneira geral, as avarias são mais comuns em processos de usinagem interrompidos (como é o caso do fresamento), pois há choques mecânicos e térmicos. Considera-se raro o acontecimento de uma avaria no corte contínuo (isto é, torneamento), sendo necessário que as condições de corte estejam fora do especificado ou que a geometria da ferramenta não seja apropriada. Já o desgaste está presente tanto no corte contínuo como no interrompido e pode atingir elevadas proporções, comprometendo a usinagem (MACHADO et al., 2011).

Como o foco deste trabalho está no torneamento, detalharemos melhor o fenômeno de desgaste e suas características.

3.3.1 Desgastes de ferramentas de corte

Uma ferramenta de corte, independentemente de sua tenacidade, está sempre sujeita ao desgaste. Ele acontece de forma progressiva tanto na superfície de folga como na superfície de saída da ferramenta (MACHADO et al., 2011). A figura 19 mostra as principais áreas sujeitas a desgaste na ferramenta:

Figura 19- Áreas principais de sujeição a desgaste em uma ferramenta de corte



Fonte: Machado et. al. (2011).

Da figura 19, é possível identificar, segundo Machado et al (2011), pelo menos três formas de desgastes diferentes:

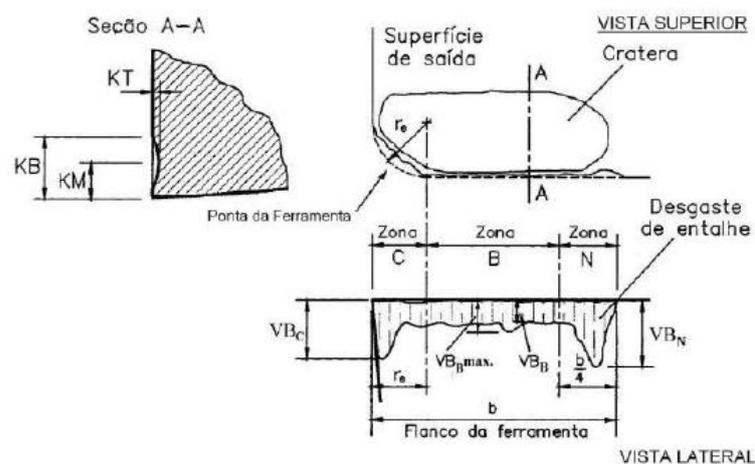
- Área A: Desgaste de cratera;
- Área B: Desgaste de flanco;
- Áreas C e D: Desgaste de entalhe.

De acordo com Santos e Sales (2007), os parâmetros recomendados pela norma ISO 3685 para quantificar o desgaste nas ferramentas de corte são: K_T , V_B , $V_{B\text{MÁX}}$ e V_{B_N} . Sendo que os critérios utilizados para a avaliação das ferramentas de corte de aço rápido, metal duro e cerâmica:

- Desgaste de flanco médio, $V_B = 0,3\text{mm}$;
- Desgaste de flanco máximo, $V_{B\text{MÁX}} = 0,6\text{mm}$;
- Profundidade de cratera, $K_T = 0,06 + 0,3f$, onde f é o avanço em mm/rot;
- Falha catastrófica.

Os parâmetro e regiões de medição de desgaste estão apresentados na figura 20.

Figura 20 – Parâmetros e regiões para medição do desgaste



Fonte: Norma ISO 3685 (1993).

3.3.1.1 Tipo de desgaste de ferramentas de corte

De acordo com Amorim (2002), há três tipos principais de desgastes aos quais a ferramenta de corte pode ser submetida, são eles: desgaste de flanco, desgaste de cratera e desgaste de entalhe. E as principais áreas sujeitas ao desgaste podem ser observadas na figura 19.

É importante garantir que, antes que o desgaste alcance grandes proporções, a ferramenta seja afiada novamente ou substituída, isso evita que o processo de usinagem seja colocado em risco (MACHADO, 2011).

Desgaste de flanco (ou frontal): este é o tipo mais encontrado de desgaste, ele acontece na superfície de folga da ferramenta e é causado pelo atrito entre a ferramenta e a peça. O desgaste frontal é observado em todo processo de usinagem e, na maior parte das vezes, ele é intensificado pelo aumento da velocidade de corte. Causado pela perda do ângulo de folga da ferramenta, o que ocasiona uma maior área de contato entre a superfície de contato entre a superfície de folga e o material da peça (DINIZ et al., 2013). O desgaste de flanco pode ser observado na figura 21.

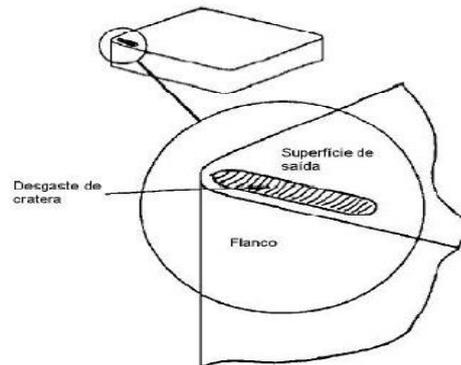
Figura 21 – Desgaste de flanco na ferramenta de corte



Fonte: Sumitomo (2015).

Desgaste de cratera: de acordo com Diniz et al. (2010), ele acontece principalmente por difusão, mas também por aderência e o desgaste de entalhe por oxidação. Ele ocorre na superfície de saída da ferramenta, região onde está localizada a zona de deslizamento do cavaco. Ele tem como um dos fatores agravantes as altas velocidades que, por gerar temperaturas altas, favorecem o mecanismo de desgaste por difusão. O desgaste assume a forma de uma cratera alongada com as extremidades arredondadas, paralela à aresta de corte (AMORIM, 2002). O desgaste de cratera pode ser observado através do esquema da figura 22.

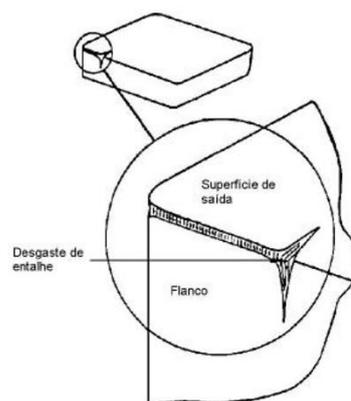
Figura 22 – Representação esquemática do desgaste de cratera



Fonte: Amorim (2002).

Desgaste de entalhe: Este tipo de desgaste tende a mudar a forma da ponta da ferramenta e, conseqüentemente, influencia no acabamento superficial da peça usinada. Ele pode acontecer nos dois extremos de contato entre a superfície de folga e a peça. Além disso, esse processo é incentivado pelas altas velocidade e temperaturas (DINIZ et al., 2013). Apesar de não haver um consenso a respeito da causa desse tipo de desgaste, sabe-se que, na maior parte das vezes, ele ocorre na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas (MACHADO, et al., 2011). O desgaste de entalhe está ilustrado na figura 23.

Figura 23 – Desgaste de entalhe em uma ferramenta de corte



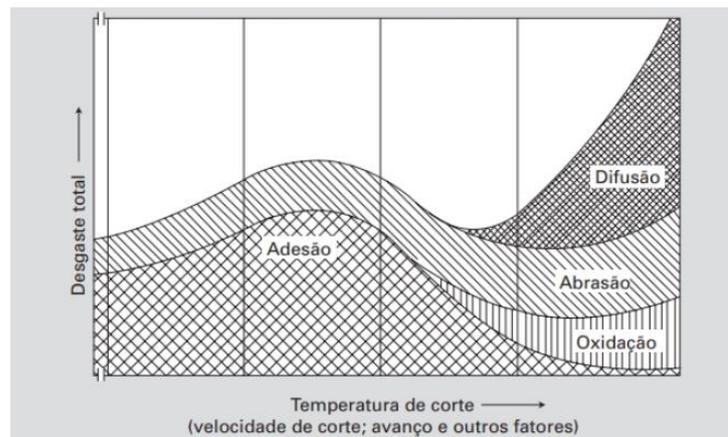
Fonte: Amorim (2002).

3.3.2 Mecanismos de desgaste de ferramentas de corte

Após o detalhamento dos tipos de desgastes que podem ocorrer nas ferramentas, é importante entender os mecanismos responsáveis por estes desgastes.

É comum que, em condições normais de corte, quase todos os tipos de desgaste estejam presentes, no entanto um deles acaba prevalecendo. Estes diversos tipos de mecanismos de desgaste e a sua dependência da temperatura podem ser observados na figura 24.

Figura 24 – Dependência dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da temperatura



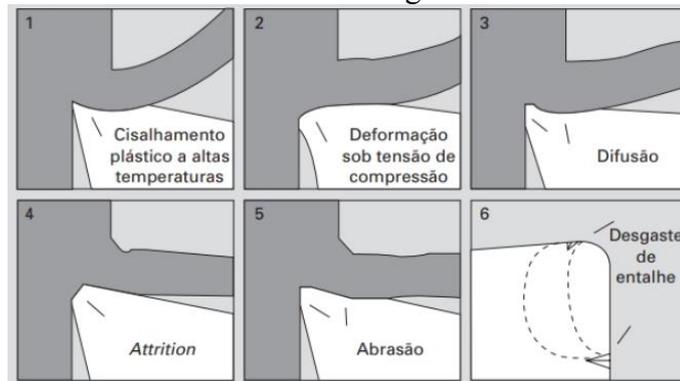
Fonte: Adaptado de Machado et. al. (2002).

De acordo com Trent; Wright (2000), os mecanismos de desgaste podem ser classificados em:

- Cisalhamento plástico a altas temperaturas;
- Deformação sob tensão de compressão;
- Difusão;
- Aderência (*attrition*)
- Abrasão;
- Desgaste de entalhe;

Estes podem ser observados na figura 25.

Figura 25 – Mecanismos de desgaste que ocorrem nas ferramentas de corte de acordo com Trent e Wright



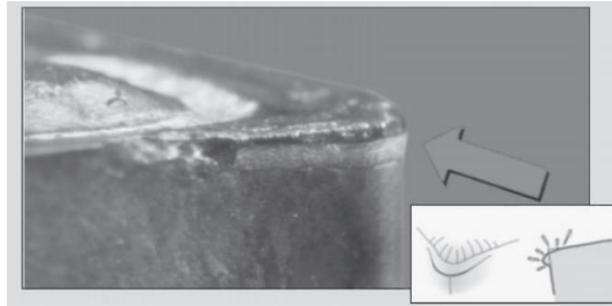
Fonte: Adaptado de Machado et. al. (2004).

No entanto, não há um consenso em relação à essa classificação, os mecanismos 1 e 2, os quais são considerados uma forma de desgaste, no mesmo nível do desgaste e da avaria por outros autores. Além disso, o mecanismo de número 6 é uma forma de desgaste, mas é colocado como mecanismo por Trent e Wright devido a falta de clareza na literatura para explicar com exatidão essa forma de desgaste. Já a oxidação, que não está presente na figura 27, está inclusa ou faz parte do desgaste de entalhe. Diniz et al. (2013) também inclui como um dos mecanismos, a aresta postiça de corte.

- **Cisalhamento plástico a altas temperaturas:** Como comentado anteriormente, este não é propriamente um mecanismo de desgaste, mas sim um processo de destruição da ferramenta de corte, que foi classificado como mecanismo por Trent e Wright. Ocorre, geralmente na usinagem de metais com alto ponto de fusão, com ferramentas de aço rápido. As tensões de cisalhamento geradas são elevadas a ponto de causar deformação plástica na superfície de saída. Como consequência das altas temperaturas e, conseqüentemente, da redução da resistência ao escoamento do material da ferramenta, o material é cisalhado com o cavaco, formando uma cratera (Machado et al., 2002).

- **Deformação sob tensão de compressão:** Este é outro mecanismo que mais se assemelha a uma forma de desgaste, porém apresenta uma classificação diferente para o Trent e Wright. Ele ocorre, na maior parte das vezes, na usinagem de materiais de elevada dureza, em ferramentas de aço rápido ou metal duro e, é intensificado, em alta velocidade de corte e de avanço. A falha ocasionada é considerada catastrófica. As tensões compressivas são máximas na extremidade da aresta e tendem a zero, de forma exponencial, no ponto em que o cavaco perde contato com a superfície de saída. Sendo assim, dependendo da tensão promovida pelo cavaco, pode ocorrer um colapso na ferramenta. A deformação pode ser observada na figura 26.

Figura 26 – Deformação na ponta de uma ferramenta



Fonte: Adaptado de Machado et. al. (2004).

- **Difusão:** consiste em uma transferência de átomos de um material para outro, o que acarreta variações nas propriedades da camada superficial da ferramenta. Tem uma dependência em relação à temperatura e a afinidade físico-química dos elementos que estão envolvidos na zona de fluxo (ou zona de cisalhamento secundário) e costuma ser intensificado em elevadas velocidades de corte e elevados avanços (AMORIM, 2002). O mecanismo de desgaste age tanto na superfície de saída como na superfície de folga. Por se processar em nível atômico, as áreas desgastadas de forma difusiva apresentam uma aparência lisa (MACHADO et al., 2004).

- **Aderência:** Diniz et al. (2013) define esse mecanismo como a formação de um extrato metálico que acarreta a aderência entre duas superfícies metálicas que estão em contato e sob cargas moderadas, baixas temperaturas e baixas velocidades de corte. Esse extrato adquire uma resistência elevada que, ao tentar ser rompida, acaba rompendo em um dos dois metais e não na superfície de contato. É responsável pelo desgaste de flanco e de cratera.

- **Abrasão mecânica:** considerado como uma das principais causas de desgaste das ferramentas de corte. Ela é causada pelo movimento relativo entre a superfície inferior do cavaco e a superfície de saída da ferramenta, e entre a nova superfície de corte e a aresta de corte da ferramenta. Ela é, usualmente, o causador do desgaste de flanco, e pode acontecer mesmo na usinagem de metais com dureza muito baixa (AMORIM, 2002). Este desgaste é influenciado pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura durante o corte, o que reduz a dureza da ferramenta. Sendo assim, a dureza a quente da ferramenta é inversamente proporcional ao nível do seu desgaste abrasivo (DINIZ et al., 2013).

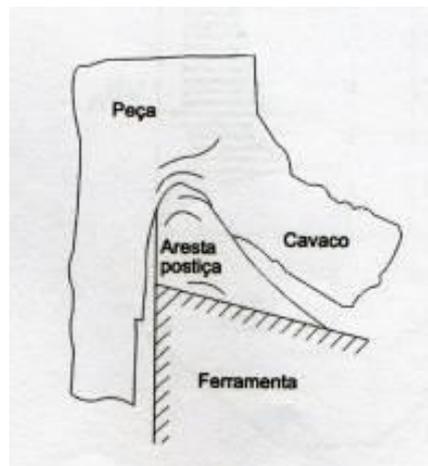
- **Desgaste de entalhe:** Como não existe na literatura um consenso a respeito do mecanismo que causa o desgaste de entalhe, ele é muitas vezes tratado como um mecanismo que acontece, geralmente, na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas

(MACHADO et al., 2002). De acordo com Shaw (1986), há diversas causas para o desenvolvimento desse tipo de desgaste, dentre elas: presença de uma camada encruada de material na superfície da peça, concentração de tensão devida a um gradiente de tensão na superfície livre, presença de uma camada abrasiva de óxidos na superfície, entre outras.

- **Oxidação:** ela é gerada na maior parte dos metais partir da presença de altas temperaturas e presença de ar e água. O Fluido de corte, quando não é utilizado e conservado da maneira correta pode se tornar ácido e ser um agente de corrosão ou oxidação no material da ferramenta (DINIZ et al., 2013).

- **Aresta postiça de corte:** ao longo do processo de usinagem, há a possibilidade de formação de cavaco na superfície de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, este, ao permanecer aderente à aresta de corte, tende a modificar seu comportamento com relação à alguns parâmetros de usinagem. Com o crescimento dessa aresta postiça, principalmente em velocidades de rotação mais baixas, ela tende a se romper de forma brusca e, conseqüentemente, arrancar partículas da superfície da peça, o que ocasiona um desgaste frontal elevado (DINIZ et al., 2013). A figura 27 exhibe uma aresta de corte.

Figura 27 – Exemplificação de uma aresta postiça de corte



Fonte: Diniz et. al. (2013).

3.4 ACABAMENTO SUPERFICIAL

O acabamento superficial de uma peça usinada consiste em um arranjo de fatores que são divididos em rugosidade, ondulações e falhas (MACHADO, 2011). Ele é considerado

como um indício da qualidade do produto, é um dos aspectos mais estimados na usinagem (GUPTA e KOHLI, 2014).

De acordo com Neto (2012), dentre os diversos fatores que influenciam no acabamento superficial de uma peça estão o raio de ponta da aresta de corte, tolerâncias de fabricação da ferramenta, desgaste ou formação de arestas postiças, escoamento do cavaco, parâmetros de corte, entre outros. Sendo assim, a textura primária da superfície é formada por sulcos ou marcas originadas das ferramentas de corte. No quadro 6 é possível observar esses fatores e algumas soluções propostas.

Quadro 6 – Fatores que influenciam no acabamento de uma superfície usinada

	Causa	Solução
Classe	Soldagem	Usar classe com baixa afinidade (cermet)
	Entalhe no flanco	Usar classe com alta resistência a oxidação (com cobertura)
Geometria	Raio de Ponta muito pequeno	Aumentar o raio de ponta
	ângulo de Saída muito pequeno	Usar inserto alisador
	Honing muito grande	Aumentar o ângulo de saída
	Flanco muito pequeno	Reduzir o tamanho da preparação
Parâmetros de corte	Avanço muito alto	Aumentar o ângulo de flanco
	Vc muito baixa	Reduzir o avanço
	Sem Refrigeração	Aumentar a Vc Usar refrigeração

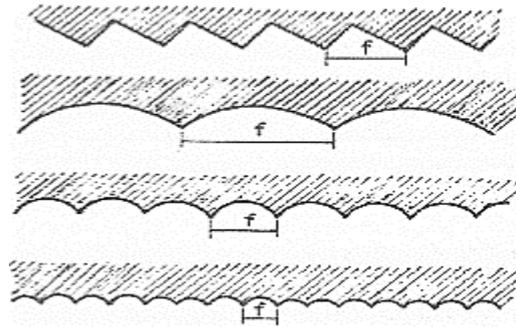
Fonte: Adaptado de Mitsubishi (2006).

Amorim (2002) define acabamento superficial como um conjunto de irregularidades, as quais possuem um espaçamento irregular ou regular, que tem a tendência de padronização ou textura característica em uma superfície. Representado, na maior parte das vezes, pela rugosidade. Essas irregularidades estão presentes em todas as superfícies, sem exceção, e podem ser consequência do método de usinagem.

A rugosidade, de acordo com Machado (2011) é composta de irregularidades ou erros microgeométricos, decorrentes do processo de corte. Ela pode ser utilizada, em muitos casos, como parâmetro de saída a fim de controlar o processo de usinagem.

De maneira geral, o avanço tem um efeito mais significativo do que a profundidade de corte na determinação do acabamento superficial da peça, sendo que um avanço pequeno pode determinar melhores acabamentos (STEMMER, 2001). A figura 28 exemplifica como a forma da ferramenta de corte e o avanço influenciam na rugosidade.

Figura 28 – Influência do avanço e forma da ferramenta no acabamento da superfície



Fonte: Stemmer (2001).

Para a determinação do acabamento superficial de uma peça a ser usinada devem ser considerados os seguintes fatores, de acordo com Kalpakjian (1995):

- O nível de acoplamento entre as superfícies;
- Coeficiente de atrito, desgaste e lubrificação;
- Resistência à corrosão e à fadiga;
- Resistividade elétrica e térmica do contato;
- Possíveis processamentos posteriores;
- Aspecto visual;
- Orçamento;

Os principais parâmetros utilizados na quantificação da rugosidade são: Rugosidade média (R_a) e Rugosidade total (R_t).

3.4.1 Parâmetros de rugosidade

De forma geral, uma peça usinada é avaliada de acordo com as tolerâncias e rugosidade determinadas em projeto. Os desvios de dimensão e de orientação costumam ser mais fáceis de serem identificados, controlados ou corrigidos. A rugosidade, entretanto, sofre influência de inúmeras variáveis e pode ser analisada através de parâmetros divididos em (MACHADO, 2011):

- *Parâmetros de amplitude*: Obtidos através das alturas dos picos, profundidade dos vales ou através dos dois. Não leva em consideração o espaçamento entre as irregularidades;

- *Parâmetros de espaço*: Definidos por meio dos espaçamentos dos desvios;
- *Parâmetros híbridos*: Determinados mediante a combinação dos parâmetros de espaço e amplitude;

O quadro 7 exibe os principais parâmetros de acordo com a Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002).

Quadro 7 – Principais parâmetros de rugosidade

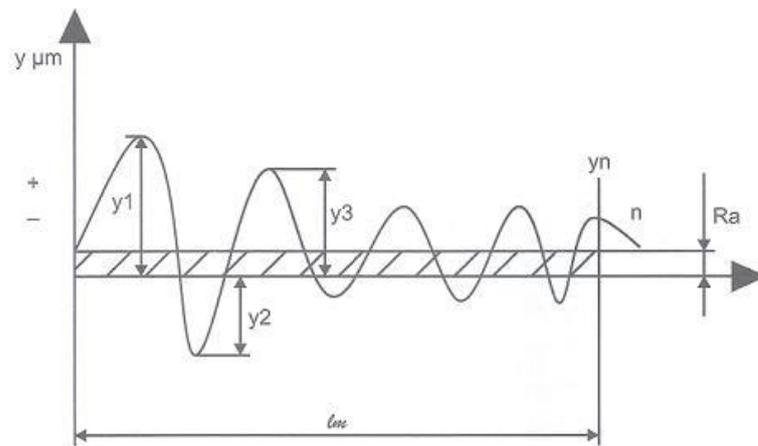
R_a	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_q	Desvio médio quadrático	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_t	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação.
R_z^*	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem.
R_{sk}	Fator de assimetria do perfil (<i>skewness</i>)	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e R_q ao cubo, no comprimento de amostragem.
R_{ku}	Fator de achatamento do perfil	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor de R_q à quarta potência no comprimento de amostragem.

Fonte: Machado et. al. (2011).

3.4.1.1 Rugosidade média (R_a)

A rugosidade média, segundo Santos e Sales (2007) é o parâmetro mais propagado e aplicado no meio industrial. Ele é obtido por meio da média das distâncias entre os pontos da superfície e a linha de centro, por toda a extensão do comprimento de amostragem. Para Machado et al. (2015), é um parâmetro considerado estável, por não ser influenciado pelos efeitos ocasionais. Entretanto, apesar de vantajoso, o parâmetro R_a , sozinho, não é eficiente na identificação de algumas características importantes da superfície, uma vez que superfícies com geometrias diferentes podem demonstrar R_a bem parecidos, mas desempenhos na usinagem bem diversos. De forma ilustrativa, a figura 29 exibe a rugosidade média.

Figura 29 – Rugosidade média (Ra)



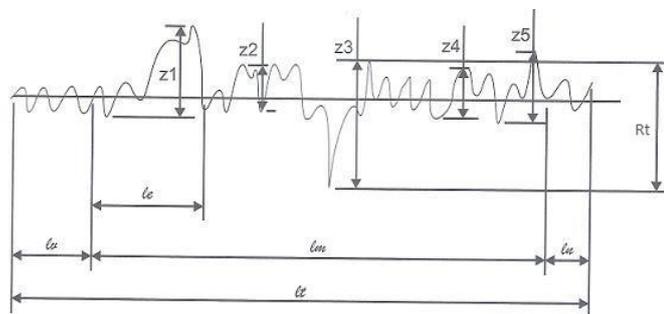
Fonte: Silva Neto (2019).

Sendo y a altura absoluta dos picos e vales e l_m o comprimento analisado.

3.4.1.2 Rugosidade total (Rt)

A Rugosidade total é definida como a soma da maior altura de pico e da maior profundidade de vale ao longo de todo o comprimento amostral. Este parâmetro tem uma utilidade nos casos em que se necessita determinar a altura máxima da rugosidade, uma vez que são amplamente influenciados por defeitos e irregularidades presentes na superfície (MACHADO et al., 2011). Na figura 30 é possível visualizar a definição de rugosidade total.

Figura 30 – Rugosidade Total (Rt)



Fonte: Silva Neto (2019).

3.5 POTÊNCIA DE USINAGEM

De acordo com Diniz et al. (2013), o comportamento e a ordem de grandeza dos esforços são importantes pois tem relação direta com a potência necessária para o corte, o qual é utilizado no dimensionamento do motor da máquina ferramenta. A potência é consumida pela máquina-ferramenta para executar o movimento de corte e promover o avanço.

A potência de usinagem é resultado do somatório das potências que são necessárias para cada componente da força de usinagem, assim como do produto da velocidade pela força e pelo cosseno do ângulo entre elas. Sendo assim, a potência de usinagem é influenciada apenas pelos componentes de corte e avanço (MACHADO, 2011). A equação 3 é utilizada para o cálculo da potência de corte, em kW, sendo F_c a força de corte e V_c a velocidade de corte:

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60 \cdot 10^3} \quad (3)$$

Já a potência de avanço, em kW, é definida na equação 4, trata-se do produto entre a força de avanço (F_f) e a velocidade avanço (V_f).

$$P_f = \frac{F_f \cdot V_f}{60 \cdot 10^6} \quad (4)$$

A potência efetiva é a soma das potências de corte (P_c) e de avanço (P_f).

Diniz et al. (2013) afirma que a potência de avanço pode ser até 140 vezes menor do que a de corte, fato que possibilita que seja desprezada a potência de avanço no dimensionamento do motor da máquina. Sendo assim, é possível igualar a potência de usinagem a potência de corte.

O cálculo da potência fornecida pelo motor (P_m) pode ser realizado através da equação 5. Na qual η é o rendimento da máquina operatriz (o qual varia de 60 a 80% em máquina convencionais e é maior que 90% em máquina CNC).

$$P_m = \frac{P_c}{\eta} \quad (5)$$

Outro tópico relevante é a pressão específica de corte (K_s), a qual é definida como uma razão entre a força de corte e a área da seção de corte (MACHADO et al, 2009). Segundo Salmon (1992), essa pressão é considerada como sendo a energia efetiva consumida na remoção de uma unidade de volume do material da peça usinada. Ela pode ser calculada através da equação 6, na qual F_c é a força de corte, f é o avanço e a_p a profundidade de usinagem, ou de corte.

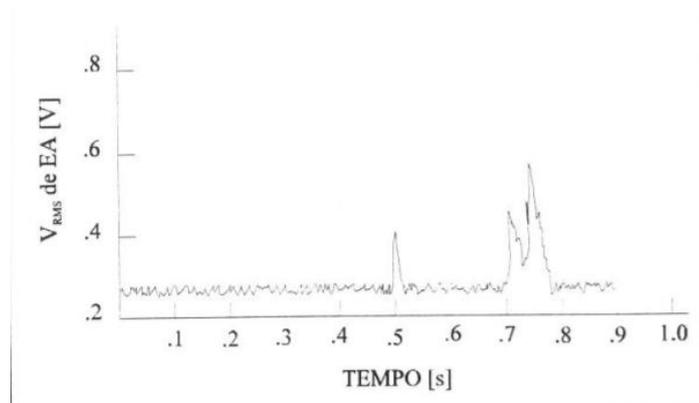
$$K_s = \frac{F_c}{f \cdot a_p} \quad (6)$$

3.6 EMISSÃO ACÚSTICA

Emissão acústica é definida por Willians (1977) como a propagação de uma onda vibracional na rede dos materiais cristalinos, em virtude do rearranjo da estrutura interna do material. Em outras palavras, a partir de um estímulo, seja ele um corte, atrito, deformação ou outros, acontece uma reordenação estrutural no material, a qual libera energia de deformação e, conseqüentemente, gera ondas de tensão elétrica que acarreta deslocamento na superfície do material. O deslocamento gerado pode ser captado através de um sensor piezoelétrico e, posteriormente, transformado em sinal elétrico. Segundo Hanchi e Klamecki (1991), o nome emissão acústica se deve ao fato da onda se propagar nos materiais com a mesma velocidade de uma onda acústica.

Durante o processo de torneamento são gerados dois tipos de sinais: sinal contínuo e de sinal de pico. O primeiro é produzido quando há deformação da peça ou do cavaco e pelo atrito cavaco/ferramenta na superfície de saída da ferramenta e atrito peça/ferramenta na superfície de folga. Já a emissão de pico é gerada por eventos restritos, como trincas, quebra ou lascamento da ferramenta e quebra ou colisão do cavaco (LAN & DORNFELD, 1986). A diferenciação entre os dois se dá pelo fato de que o sinal de pico apresenta uma energia maior do que o sinal contínuo, o que pode ser observado na figura 31.

Figura 31 – Exemplo de sinal de emissão acústica



Fonte: Lan & Dornfeld (1986).

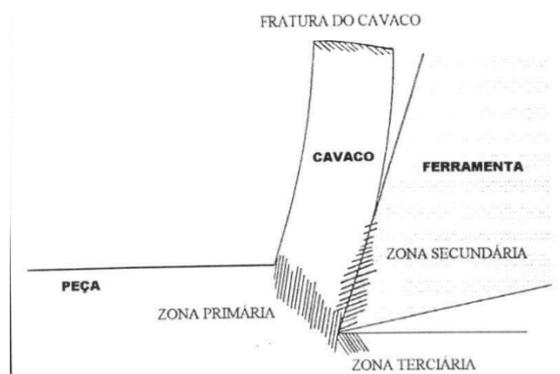
Um das principais vantagens da utilização do sinal de emissão acústica no monitoramento do processo de usinagem, segundo Rangwala et. Al. (1987), está no fato de que a faixa de frequência de um sinal de emissão acústica estar muito acima da frequência de vibrações mecânicas ou outros ruídos que podem acontecer no ambiente. Entretanto, a alta frequência prejudica a amostragem e o armazenamento do sinal digitalizado durante o processo, uma vez que, para que o sinal seja confiável é necessária a captação de uma quantidade alta de pontos.

Dois principais problemas em relação à emissão acústica são: a dificuldade de desenvolvimento de modelos teóricos em função das várias fontes geradores e da natureza aleatória dos sinais de pico; e o fato de que a emissão acústica viaja através de corpos físicos e que as interfaces existentes da geração até o sensor podem intervir no sinal (Hanchi e Klamecki, 1991).

As principais fontes de emissão acústica identificadas por Lan e Dornfeld (1986) são mencionadas a seguir e podem ser observadas na figura 32 também.

- *Zona primária de deformação*: região onde acontece o cisalhamento do cavaco;
- *Zona secundária de deformação*: região de atrito entre peça e superfície de saída da ferramenta;
- *Zona terciária de deformação*: região de atrito entre peça e superfície de folga da ferramenta;
- Quebra do cavaco ou colisão deste com a peça ou ferramenta;
- Lascamento ou quebra da ferramenta.

Figura 32 – Principais fontes de emissão acústica no torneamento



Fonte: Lan & Dornfeld (1986).

3.7 VIBRAÇÃO

Todos os corpos compostos de massa e elasticidade são capazes de vibração. O estudo dessa vibração tem relação com os movimentos oscilatórios de corpos e forças que lhes são associados (THOMSON, 1978).

Uma vez que nenhum sistema pode ser considerado completamente rígido, todo corpo que for submetido à esforços vibra. Sendo assim, durante o processo de usinagem essas vibrações estão presentes e podem ser utilizadas como indicativos do status do processo.

Costa (1995) define a vibração nos processos de usinagem como o movimento cíclico alusivo entre peça e ferramenta, e está presente em todos os processos de torneamento. Uma das maiores barreiras no quesito vibração consiste na determinação de sua faixa de amplitude, já que ela sofre influência de inúmeros fatores. Alguns desses fatores são: formação do cavaco, estágio de conservação da máquina, instalação inadequada, ferramentas em diferentes de vida, entre outros.

Para Shaw (1968), as fontes responsáveis pela vibração são divididas em dois grandes grupos, são eles:

- 1) Vibração forçada;
- 2) Vibração auto-excitada

O primeiro grupo acontece quando há ação de forças externas cíclicas, as quais induzem o sistema a vibrar na mesma frequência da excitação. Entre os fatores que causam a vibração forçada estão:

- A) Desbalanceamento de eixos;
- B) Folga de mancais e rolamentos;
- C) Utilização da máquina acima de sua capacidade.

Uma vez conhecidos os principais fatores geradores, Jacobsen e Ayre (1956) sugerem algumas medidas paliativas, como: eliminação das forças excitantes cíclicas, evitar ressonância e aumentar a rigidez do sistema.

A vibração auto-excitada, por sua vez, acontece quando a energia absorvida é maior do que a liberada durante o ciclo simples. Uma forma de indução desse tipo de vibração é a ocorrência de algum tipo de choque na ferramenta ou incrustação mais dura no material da peça (SHAW, 1968). Ela pode ter origem em usinagem descontínua, espessura do cavaco variável e atrito peça-ferramenta (COSTA, 1995).

No que diz respeito ao monitoramento do processo, Costa (1995) afirma que o tipo de vibração mais relevante é a auto excitada, já que ela representa o contato ferramenta-peça e cavaco-ferramenta.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão apresentados os materiais, métodos, as etapas de desenvolvimento e a maneira de análise dos resultados da pesquisa.

4.1 MATERIAL

Foi utilizado como material o aço AISI 52100. Sua composição química está apresentada na tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Composição química do aço AISI 52100

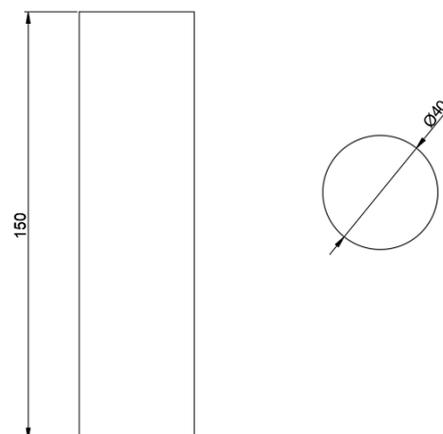
ABNT/SAE	C	Si	Mn	Cr	P	S	Fe
52100	1,07	0,22	00,43	1,48	0,025	0,035	96,74

Fonte: Autor.

4.2 CORPO DE PROVA

O corpo de prova foi preparado com antecedência, tendo de início 40mm de diâmetro e 150mm de comprimento. Ele foi temperado e revenido e sua dureza de 65HRc. A figura 33 mostra o desenho técnico do corpo de prova com suas dimensões cotadas, já a figura 34 ilustra o corpo de prova em posição para ser usinado, já fixado ao centro de torneamento CNC Romi modelo GL 240M.

Figura 33 – Desenho técnico do corpo de prova com cotas



Fonte: Autor.

Figura 34 – Corpo de prova posicionado para ser usinado



Fonte: Autor.

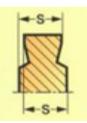
4.3 FERRAMENTAS DE CORTE

Para os processos de usinagem foram utilizadas ferramentas doadas pela Fabricante Seco Tools e são ferramentas de metal duro: uma com revestimento CVD e outra com revestimento PVD.

4.3.1 Ferramenta 1: Metal Duro com revestimento PVD da marca Seco

A ferramenta TH1000, código CNMG120412 (o quadro 8 apresenta a codificação da pastilha) com quebra-cavado do tipo MF5 com revestimento TiAlSiN pelo processo PVD pertence a classe super microfina, tem dureza elevada e é destinada, principalmente, na usinagem de aços parcialmente endurecidos e superligas. Devido a sua notável tenacidade na aresta, ela oferece alto desempenho em cortes interrompidos e na remoção de superfícies duras (SECO, 2020). A ferramenta utilizada nos ensaios está ilustrada na figura 35.

Quadro 8 – Codificação da Pastilha de Corte.

C	Formato do Inseto:	Romboidal 80°									
N	Ângulo de Folga:	0°									
M	Classe de Tolerância:	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tolerância do Raio da Ponta M (mm)</th> <th>Tolerância do Círculo Inscrito IC (mm)</th> <th>Tolerância da Espessura S (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>±0.08—±0.18</td> <td>±0.05—±0.15</td> <td>±0.13</td> </tr> </tbody> </table>	Tolerância do Raio da Ponta M (mm)	Tolerância do Círculo Inscrito IC (mm)	Tolerância da Espessura S (mm)	±0.08—±0.18	±0.05—±0.15	±0.13			
Tolerância do Raio da Ponta M (mm)	Tolerância do Círculo Inscrito IC (mm)	Tolerância da Espessura S (mm)									
±0.08—±0.18	±0.05—±0.15	±0.13									
G	Fixação e/ou Superfície de Saída:	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Furo</th> <th>Configurações do Furo</th> <th>Quebra-Cavacos</th> <th>Figura</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Com Furo</td> <td>Furo Cilíndrico</td> <td>Bifacial</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Furo	Configurações do Furo	Quebra-Cavacos	Figura	Com Furo	Furo Cilíndrico	Bifacial		
Furo	Configurações do Furo	Quebra-Cavacos	Figura								
Com Furo	Furo Cilíndrico	Bifacial									
12	Tamanho do Inseto	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Diâmetro do Círculo Inscrito (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>12.70</td> </tr> </tbody> </table>	Diâmetro do Círculo Inscrito (mm)	12.70							
Diâmetro do Círculo Inscrito (mm)											
12.70											
4	Espessura do Inseto:	04 s = 4,76									
12	Configuração do Raio de Ponta:	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Símbolo</th> <th>Raio da Ponta (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>12</td> <td>1.2</td> </tr> </tbody> </table>	Símbolo	Raio da Ponta (mm)	12	1.2					
Símbolo	Raio da Ponta (mm)										
12	1.2										

Fonte: Adaptado de Mitisubishi (2007).

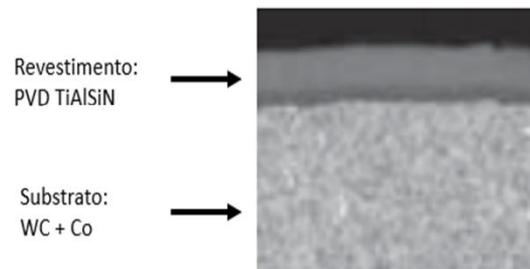
Figura 35 – Ferramenta com revestimento TiAlSiN, com quebra cavaco MF5 (TH1000)



Fonte: Autor.

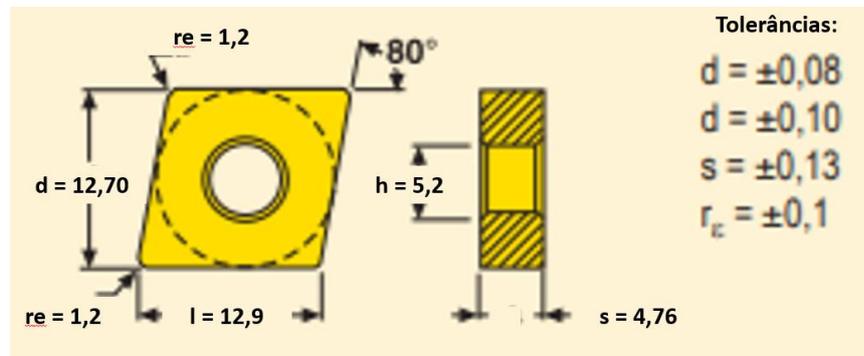
As camadas de revestimento depositadas sobre o metal duro estão representadas na figura 36. Já na figura 37 é possível encontrar as dimensões fornecidas pelo fabricante. As recomendações de uso da ferramenta providas pelo fabricante se encontram na tabela 2.

Figura 36 – Substrato e revestimento PVD



Fonte: Adaptado de Seco (2020).

Figura 37 – Dimensões da ferramenta em mm



Fonte: Adaptado de Seco (2020).

Tabela 2 – Recomendações de parâmetros para a ferramenta de PVD TH1000

Profundidade de corte ($a_p = \text{mm}$)			Avanço de corte ($f_n = \text{mm/rot}$)			Velocidade de corte ($V_c = \text{m/min}$)		
Ideal	Mín.	Máx.	Ideal	Mín.	Máx.	Ideal	Mín.	Máx.
2,00	0,40	2,70	0,30	0,20	0,45	110	95	125

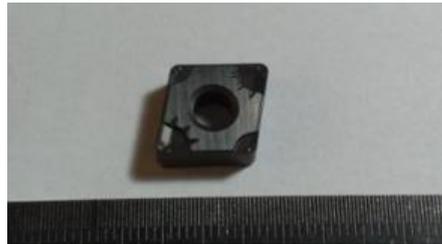
Fonte: Adaptado de Seco (2020).

4.3.2 Ferramenta 2: Metal Duro com revestimento CVD da marca Seco

A ferramenta TH1500, cujo código é CNMG1204412 com quebra-cavado do tipo MF5 e cobertura CVD ($\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3$), possui alta dureza e resistência ao desgaste, de acordo com o fabricante ela é recomendada para usinagem de aços endurecidos com dureza de 40-52 HRC.

Ela também é conhecida como *Duratomic*. Pode ser classificada como uma classe alternativa para acabamento de ferros fundidos (SECO, 2020). A ferramenta utilizada nos ensaios está representada na figura 38.

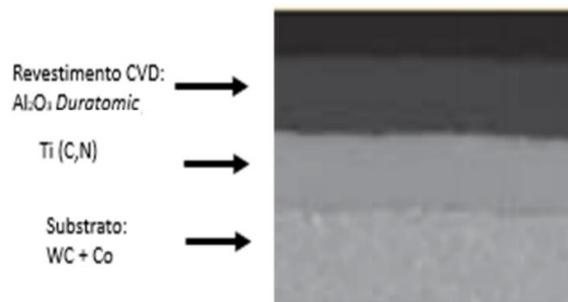
Figura 38 – Ferramenta com revestimento $Ti(C,N)+Al_2O_3$, com quebra cavaco MF5(TH1500)



Fonte: Autor.

As camadas de $Ti(C,N)+Al_2O_3$ sobre o substrato de metal duro na ferramenta TH1500 estão demonstrados na figura 39. As dimensões fornecidas pelo fabricante estão expostas também na figura 37 e as recomendações de uso podem ser encontradas na tabela 3.

Figura 39 - Substrato e revestimento CVD



Fonte: Adaptado de Seco (2020).

Tabela 3 – Recomendações de uso para a ferramenta de CVD TH1500 da Seco

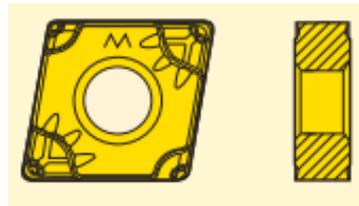
Profundidade de corte ($a_p = \text{mm}$)			Avanço de corte ($f_n = \text{mm/rot}$)			Velocidade de corte ($V_C = \text{m/min}$)		
Ideal	Mín.	Máx.	Ideal	Mín.	Máx.	Ideal	Mín.	Máx.
2,00	0,40	2,70	0,30	0,20	0,45	130	110	150

Fonte: Seco (2020).

4.3.3 Quebra-cavaco

Ambas as ferramentas, 1 e 2, são da fabricante Seco e possuem o quebra-cavaco da classe MF5. Este tipo de quebra-cavaco é mais indicado para semi acabamento de aços, com avanço elevado. Sua geometria é aberta e bastante positiva provido de raio alisador. É aplicada para: $f = 0,2-0,8$ mm/rot e $a_p = 0,2-2,7$ mm (SECO, 2020). A figura 40 exemplifica uma ferramenta com o quebra-cavaco MF5.

Figura 40 – Ferramenta de corte com quebra-cavaco MF5



Fonte: Seco (2020).

4.4 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

4.4.1 Centro de Torneamento CNC

Para a realização dos ensaios foi utilizado um Centro de Torneamento CNC da marca Romi, modelo GL 240M (Figura 41), para o qual montado um sistema de aquisição de dados. O projeto de pesquisa foi todo desenvolvido no Laboratório da Usinagem na Unesp-Guaratinguetá.

Figura 41 – Centro de Torneamento CNC Romi modelo GL 240M



Fonte: Autor.

4.4.2 Rugosímetro

Para a avaliação da qualidade superficial das peças usinadas através da rugosidade foi utilizado um rugosímetro da marca Mahr modelo Marsurf M300 (Figura 42). Ele possui uma ponta apalpadora em formato de cone esférico feita de diamante e com raio de ponta de $2\mu\text{m}$. Para os ensaios realizados foram utilizados os parâmetros Ra e Rt com comprimento de amostragem adotado (*cut-off*) de 0,25mm. O *cut-off* é definido como o valor que relaciona a distância dos sulcos originados pelo avanço (f) da ferramenta durante o processo de usinagem.

Figura 42 – Rugosímetro da marca Mahr modelo Marsurf M300



Fonte: Autor.

No total, foram realizadas três medidas de rugosidade em cada sequência de usinagem, serão considerados os valores de Ra (Rugosidade média) e Rt (Rugosidade total).

4.4.3 Microscópios

As ferramentas de corte e os cavacos gerados durante a usinagem foram analisados e medidos no microscópio. A determinação do desgaste, identificando o tipo de avaria ocasionado durante o processo foi realizado utilizando o microscópio óptico de medição da marca Mahr, modelo MarVision MM20, representado na figura 43.

Figura 43 - Microscópio óptico de medição da marca Mahr, modelo MarVision MM20



Fonte: Autor.

As fotos foram feitas com o microscópio estéreo da marca Zeiss, modelo Stemi2000, apresentado na figura 44. Foi avaliado e identificado o tipo de desgaste após o processo.

Figura 44 - Microscópio da marca Zeiss, modelo Stemi2000



Fonte: Autor.

4.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Os valores de potência de corte, emissão acústica e vibração gerados durante todo o processo de usinagem foram captados em tempo real por meio de um sistema computadorizado com sensores adequados. Esse sistema permite a obtenção de quaisquer variáveis físicas que, mediante sensores ou transdutores apropriados, são convertidos em sinais elétricos proporcionais.

Para as coletas foi utilizado um programa supervisorio desenvolvido que adquire os dados com uma taxa de 4000 pontos por segundo. Este programa foi desenvolvido através da plataforma do software Labview 7.1 2012, da *National Instruments*. O sistema ainda contou com uma placa de aquisição de dados da mesma empresa do software, modelo NI PCI 6220, que foi acoplada ao computador. A placa teve a finalidade de receber os sinais analógicos enviado dos sensores acoplados ao centro de usinagem e transformá-los em sinais digitais para serem interpretados pelo software.

4.5.1 Potência de corte

A fim de adquirir a potência consumida pelo motor do centro de torneamento foi utilizado um sensor de corrente, da marca LEM modelo AT 100 B10, conforme figura 45.

Figura 45 – Sensor de corrente, marca LEM modelo AT100 B10



Fonte: Autor.

Em função da corrente elétrica de uma das fases do motor, o sensor gera uma saída proporcional de 0 a 10 Volts de corrente contínua (VCC), o qual é armazenado pelo computador. Visto que o sinal adquirido pelo sistema tem uma saída proporcional em Volts, é necessária a conversão do valor para Ampères. Para tal o fabricante fornece a equação 7 a seguir.

$$I = U_{cc} * 10 \quad (7)$$

Na qual:

I = corrente de uma das fases em Ampères;

U_{cc} = tensão de corrente contínua em Volts.

Ao substituir o valor da corrente, o valor da tensão de fase do motor do centro de usinagem (220V) e o fator de potência do motor (0,92), na equação 8, a qual foi utilizada para transformar o sinal adquirido em Volts para potência consumida em Watts, e multiplicando toda a equação por $\sqrt{3}$ (visto que o motor é trifásico), obteve-se a equação 9.

$$P_c = I \times U_f \times F_p \times \sqrt{3} \quad (8)$$

Na qual:

P_c = potência consumida, em Watts;

I = corrente alternada de uma das fases, em Ampères;

U_f = tensão de uma das fases, em Volts;

F_p = fator de potência.

$$P_c = U_{cc} * 10 * 0,92 * 220 * \sqrt{3} \quad (9)$$

A partir dos dados de potência de corte obtidos foi possível calcular a força de corte (F_c) e a pressão específica de corte (K_s) através das equações 10 e 11, respectivamente. Nas quais P_c é a potência de corte, V_c a velocidade de corte, f o avanço e a_p a profundidade de corte.

$$F_c = \frac{P_c \cdot 60 \cdot 10^3}{V_c} \quad (10)$$

$$K_s = \frac{F_c}{f \cdot a_p} \quad (11)$$

4.5.2 Vibração

A fim de adquirir os valores de vibração foram utilizados um sensor piezelétrico com saída em mm/s e um amplificador de sinal com saída em RMS (valor quadrático médio), marca Vibro Control e modelo TV100, o qual está ilustrado na figura 46.

Figura 46 – Sensor piezelétrico da marca Vibro Control e modelo TV100



Fonte: Autor.

Os valores foram obtidos em VCC e, posteriormente, convertidos em valores de velocidade em mm/s por meio da equação 12 fornecida pelo fabricante.

$$V = \frac{25 * VCC}{8} \quad (12)$$

4.5.3 Emissão acústica

Para a obtenção dos dados de emissão acústica foi utilizado um módulo de emissão acústica composto por um sensor piezelétrico e um amplificador de sinal elétrico com saída em RMS (valor quadrático médio) da marca PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, modelo do sensor R15A e modelo do amplificador de sinal 1272-1000, conforme mostrados na figura 47.

Figura 47 – Módulo de emissão acústica (1), sensor (2) e amplificador (3)



Fonte: Autor.

O sinal elétrico retificado corresponde à unidade VCC e é amplamente empregado nessa grandeza para expressar a emissão acústica, não havendo a necessidade de transformações para outras unidades.

4.6 TIPOS E FORMAS DE CAVACO

Durante o ensaio, a cada medição e passada realizado, foi coletado uma amostra do cavaco gerado a fim de analisar posteriormente. As imagens dos cavacos foram obtidas com a ajuda de um microscópio para analisar os tipos e formas. Eles foram classificados em cisalhados ou contínuos, segundo norma ISO 3685 (1993).

4.7 PROCEDIMENTOS E PROCESSO DE USINAGEM

Durante os ensaios, as duas ferramentas (uma com revestimento CVD e outra PVD) foram submetidas à usinagem na condição a seco e, ao longo do processo, foram diversificados os seguintes parâmetros:

- Velocidade de corte (V_c) – 60 e 100m/min.
- Avanço (f) – 0,05 e 0,1 mm/rot.

A profundidade de corte não foi variada ($a_p = 0,25\text{mm}$) e o percurso de avanço também se manteve constante em 100 mm. Foram realizadas duas repetições de cada condição.

A tabela 4 apresenta os experimentos realizados. Para cada ensaio, a aresta de corte utilizada foi a mesma.

Tabela 4 – Ensaio realizados

Experimento	Ferramenta	Condição	Vc (m/min)	f (mm/rot)
1	TH1000	1	60	0,05
2	TH1000	2	60	0,1
3	TH1000	3	100	0,05
4	TH1000	4	100	0,1
5	TH1500	1	60	0,05
6	TH1500	2	60	0,1
7	TH1500	3	100	0,05
8	TH1500	4	100	0,1

Fonte: Autor.

A cada variação e passada da ferramenta, foram obtidas amostras de cavaco, dados de potência de corte, vibração, emissão acústica, rugosidade e foi feita a verificação da condição de cada ferramenta de corte. A figura 48 captura o momento em que o corpo de prova de aço AISI 52100 estava sendo usinado. Já a figura 49 ilustra a fixação e posicionamento da ferramenta de corte no torno.

Figura 48 – Corpo de prova durante o processo de usinagem



Fonte: Autor.

Figura 49 – Fixação da ferramenta



Fonte: Autor.

4.8 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE DADOS

A partir dos dados que foram obtidos durante as medições e de cada passada, foram utilizados softwares de computadores a fim de analisar a presença de correlações entre as variáveis medidas no processo, como a velocidade de corte e o avanço, e o desgaste das ferramentas de corte. Além disso, houve a análise da relação entre as ferramentas escolhidas para o ensaio e as variáveis como rugosidade do material, potência consumida, emissão acústica e vibração.

Os dados, depois de obtidos, foram armazenados e convertidos para unidades convenientes no software *Microsoft Excel*. O próximo passo consistiu na análise estatística dos dados através do software *Minitab*, no qual foi possível realizar a comparação e verificar a relação entre diversas variáveis, comparando de forma isolada a ferramenta CDV e a ferramenta PVD. O arranjo utilizado foi do tipo fatorial completo, sendo duas ferramentas, dois avanços, duas velocidades de corte e duas repetições. Ou seja, foram oito diferentes condições repetidas duas vezes, totalizando um total de 16 ensaios.

A tabela 5 apresenta as oito condições. Para cada ensaio, a aresta de corte utilizada foi a mesma.

Tabela 5 – Condições experimentais

Experimento	Ferramenta	Condição	Vc (m/min)	f (mm/rot)
1	TH1000	1	60	0,05
2	TH1000	2	60	0,1
3	TH1000	3	100	0,05
4	TH1000	4	100	0,1
5	TH1500	1	60	0,05
6	TH1500	2	60	0,1
7	TH1500	3	100	0,05
8	TH1500	4	100	0,1

Fonte: Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos próximos itens serão apresentados os resultados do trabalho, a influência dos fatores de velocidade de corte, avanço e ferramenta, na potência, vibração, emissão acústica, rugosidades total e média, os tipos e formas de cavacos, o desgaste das ferramentas, o desgaste de flanco, a força de corte e a pressão específica de corte. Os valores de potência, vibração e emissão acústica foram captados com 4000 pontos por segundo usando software *Labview* e tratados no *Matlab* sendo considerados valores médios para cada ensaio. As análises estatísticas e gráficos foram realizadas através do software *Minitab 17* (nível de confiança de 95%) a fim de verificar se houve interação entre ferramenta, avanço e velocidade de corte nas variáveis de saída do processo.

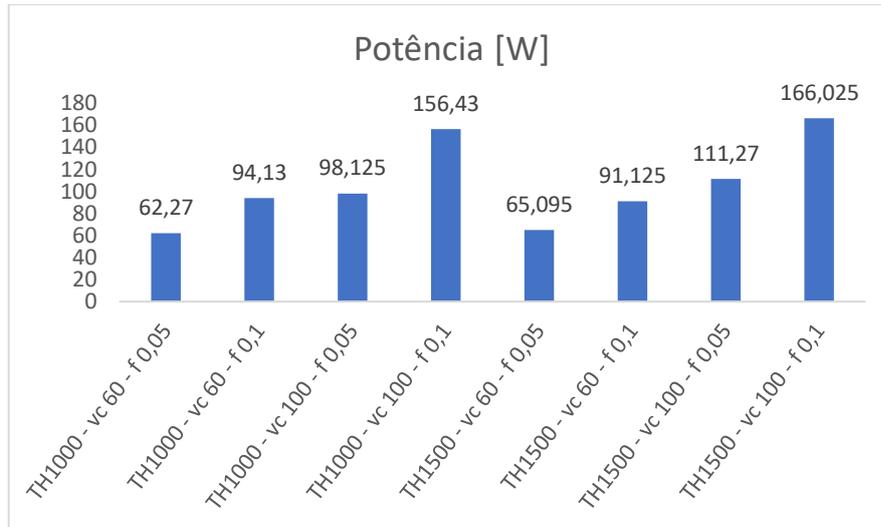
De maneira geral, são considerados significativos estatisticamente aqueles parâmetros ou combinação de parâmetros que apresentam um valor de valor-P (o qual indica a probabilidade de se observar uma diferença tão grande ou maior do que a que foi observada sob a hipótese nula) menor que 0,05. Já o valor-F, quando baixo, representa uma baixa variabilidade em relação à variabilidade dentro de cada grupo, por isso, dizemos que quando o valor-F é maior ou igual a dois, rejeita-se a hipótese nula de as médias dos grupos são iguais, ou seja, há uma sinergia entre os parâmetros combinados. Além disso, todos os dados estão normais (distribuição normal).

Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

5.1 PRINCIPAIS EFEITOS PARA POTÊNCIA DE CORTE

A média das potências consumidas durante cada um dos ensaios está apresentada na figura 50. Na qual, pode-se observar que o menor consumo de potência se deu em condições de menor avanço e velocidade de corte, em ambas as ferramentas.

Figura 50 – Gráfico da média da potência consumida durante os ensaios



Fonte: Autor.

No quadro 9 estão os dados obtidos através da análise de variância e das influências sobre a média. É possível concluir que todos os parâmetros lineares do quadro 9 influenciaram de forma significativa estatisticamente. Além disso, duas interações de segunda ordem também se mostraram significativas estatisticamente, são elas ferramenta mais velocidade corte e velocidade de corte mais avanço, os parâmetros em questão estão evidenciados em amarelo no quadro 9.

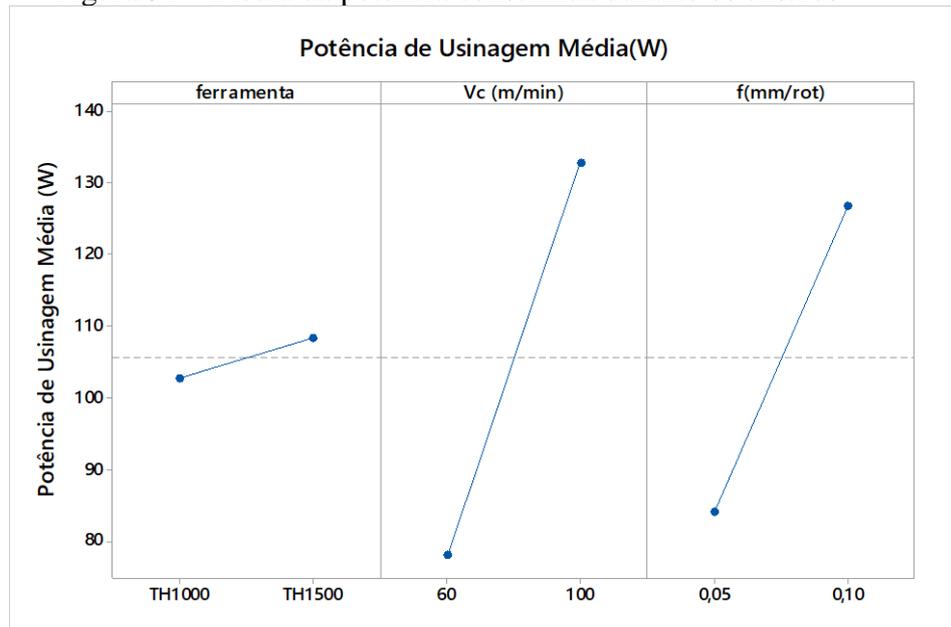
Quadro 9 – Dados da análise de variância para a potência de corte

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor-F	Valor-P
Modelo	7	20363,9	2909,1	156,06	0,000
Linear	3	19448,2	6482,7	347,76	0,000
ferramenta	1	127,3	127,3	6,83	0,031
Vc (m/min)	1	12015,1	12015,1	644,54	0,000
f (mm/rot)	1	7305,9	7305,9	391,91	0,000
Interações de 2ª ordem	3	914,4	304,8	16,35	0,001
ferramenta*Vc (m/min)	1	131,4	131,4	7,05	0,029
ferramenta*f (mm/rot)	1	22,0	22,0	1,18	0,309
Vc (m/min)*f (mm/rot)	1	760,9	760,9	40,82	0,000
Interações de 3ª ordem	1	1,3	1,3	0,07	0,799
ferramenta*Vc (m/min)*f (mm/rot)	1	1,3	1,3	0,07	0,799
Erro	8	149,1	18,6		
Total	15	20513,0			

Fonte: Autor.

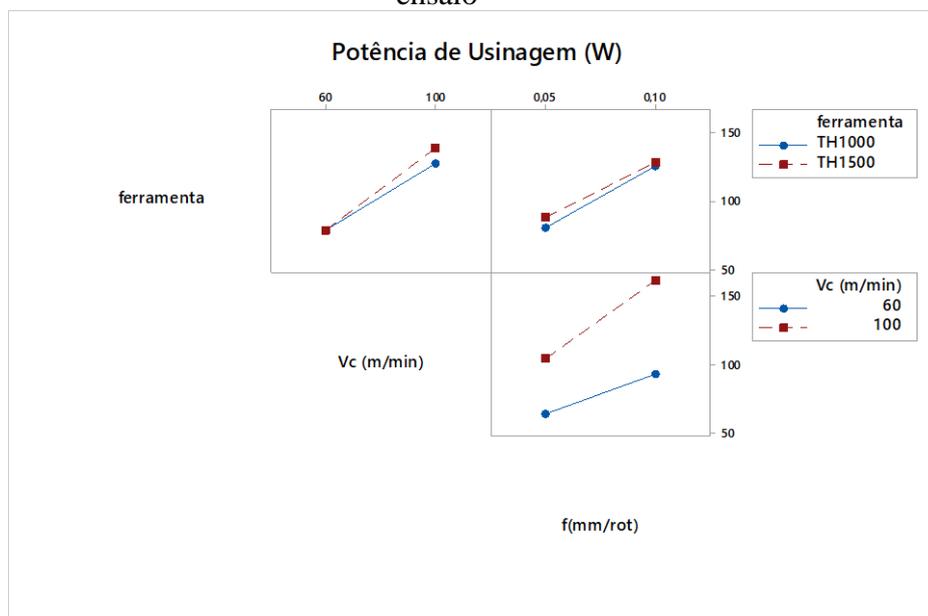
A figura 51 apresenta os efeitos causados pelos fatores ferramenta (TH1000 e TH1500), avanço e velocidade de corte em relação à média da potência de corte durante o torneamento dos corpos de prova de aço AISI 52100 e, na figura 52, é possível observar a influência das interações de segunda ordem.

Figura 51 – Média da potência consumida durante os ensaios



Fonte: Autor.

Figura 52 – Influência das interações dos parâmetro sobre a potência consumida durante o ensaio



Fonte: Autor.

Através da figura 51 é possível verificar de forma visual a influência dos parâmetros de corte, confirmando os dados obtidos no software *Minitab* e apresentados no quadro 9. É perceptível, em função na maior inclinação das retas, que a velocidade de corte e o avanço demonstraram uma maior influência na variável de saída, quando comparadas à ferramenta de corte. Quanto menor a velocidade de corte e o avanço, há uma menor área de contato durante a usinagem, sendo assim, observa-se o menor consumo de potência de corte. Já a influência da ferramenta de corte pode ser explicada pelo fato de a TH1000 (PVD) tratar-se de uma ferramenta de dureza superior, sendo assim, o seu atrito durante a usinagem tende a ser menor e, conseqüentemente, consome menos potência durante o processo.

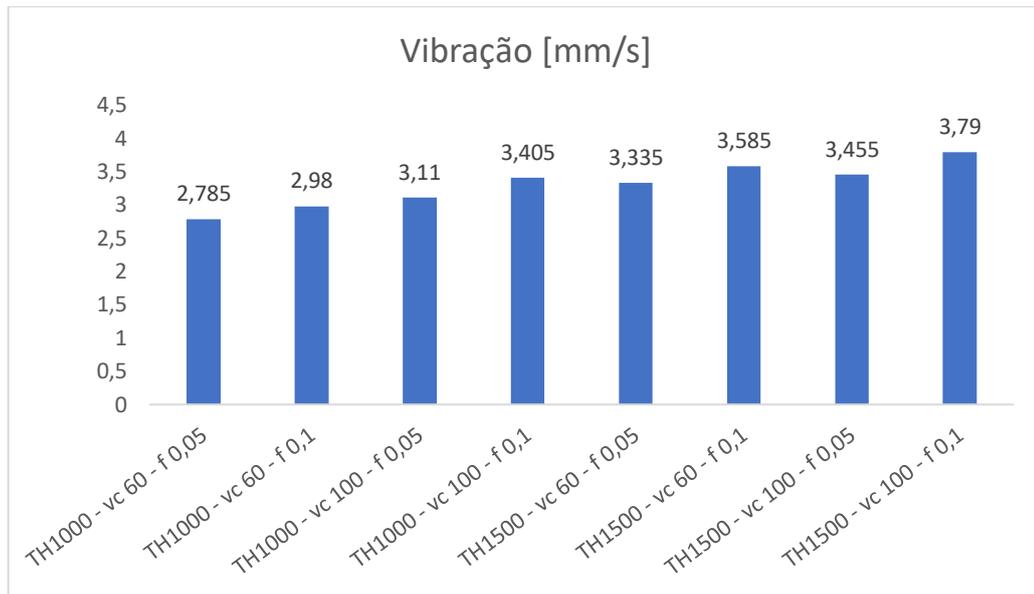
A figura 52 por sua vez, é a representação gráfica da sinergia entre dois parâmetros, ou seja, parâmetros que tiveram uma significância estatística quando combinados entre si. Quando as linhas dos gráficos se cruzam, ou tem uma tendência a se cruzarem, podemos dizer que elas apresentam uma interação. No entanto, os gráficos podem não apresentar a informação de forma tão sensíveis e perceptível quanto o valor de valor-P apresentados no quadro 9, contudo, neste caso, é possível observar que os gráficos de ferramenta mais velocidade de corte e velocidade de corte mais avanço, apresentam uma tendência de cruzamento na parte inferior. O gráfico de avanço mais ferramenta, apesar de não representar uma significância estatística ($\text{valor-P} > 0,05$), apresenta linhas próximas e com um cruzamento na parte superior, isso pode ser explicado pelo valor de valor-F próximo a 2, o que confere a essa interação certa influência.

Sendo assim, pela figura 51, é possível concluir que a combinação de parâmetros que consumiu menor potência durante o processo foi a ferramenta TH1000, o avanço de 0,05 mm/rot e a velocidade de corte de 60 m/min.

5.2 PRINCIPAIS EFEITOS PARA A VIBRAÇÃO

A figura 53 descreve a média das vibrações durante cada ensaio. Observa-se que há uma menor tendência de vibração com a ferramenta TH1000.

Figura 53 – Gráfico da média das vibrações durante os ensaios



Fonte: Autor.

No quadro 10 estão os dados obtidos através da análise de variância e das influências sobre a média. É possível concluir que todos os parâmetros lineares do quadro 10 influenciaram de forma significativa estatisticamente. Além disso, uma interação de segunda ordem também se mostrou significativa estatisticamente: ferramenta mais velocidade de corte, os parâmetros em questão estão evidenciados em amarelo no quadro 10.

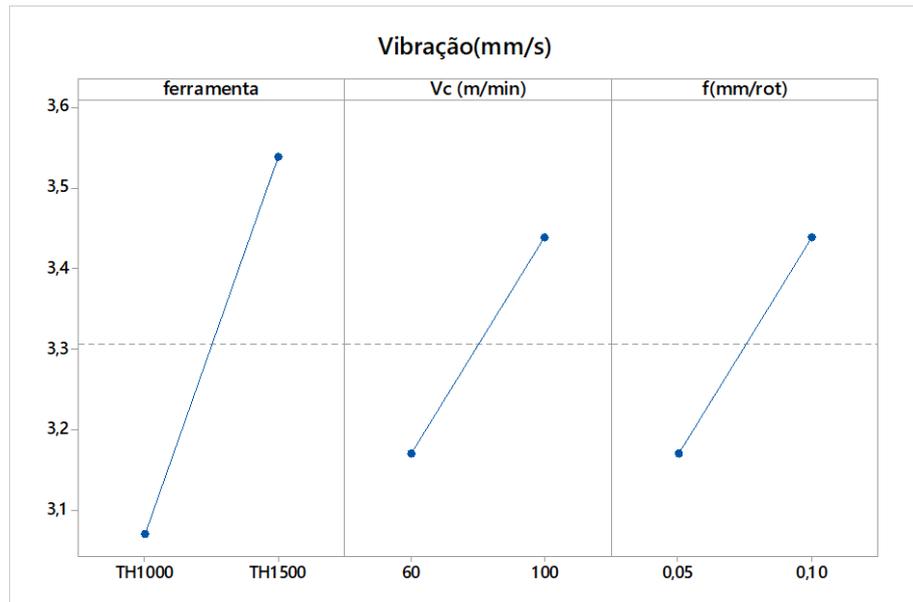
Quadro 10 – Dados da análise de variância para a vibração

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor-F	Valor-P
Modelo	7	1,51200	0,216001	104,15	0,000
Linear	3	1,45706	0,485688	234,19	0,000
ferramenta	1	0,88017	0,880171	424,40	0,000
Vc (m/min)	1	0,28795	0,287954	138,85	0,000
f (mm/rot)	1	0,28894	0,288940	139,32	0,000
Interações de 2ª ordem	3	0,05487	0,018291	8,82	0,006
ferramenta*Vc (m/min)	1	0,04433	0,044333	21,38	0,002
ferramenta*f (mm/rot)	1	0,00226	0,002257	1,09	0,327
Vc (m/min)*f (mm/rot)	1	0,00828	0,008283	3,99	0,081
Interações de 3ª ordem	1	0,00007	0,000065	0,03	0,863
ferramenta*Vc (m/min)*f (mm/rot)	1	0,00007	0,000065	0,03	0,863
Erro	8	0,01659	0,002074		
Total	15	1,52860			

Fonte: Autor.

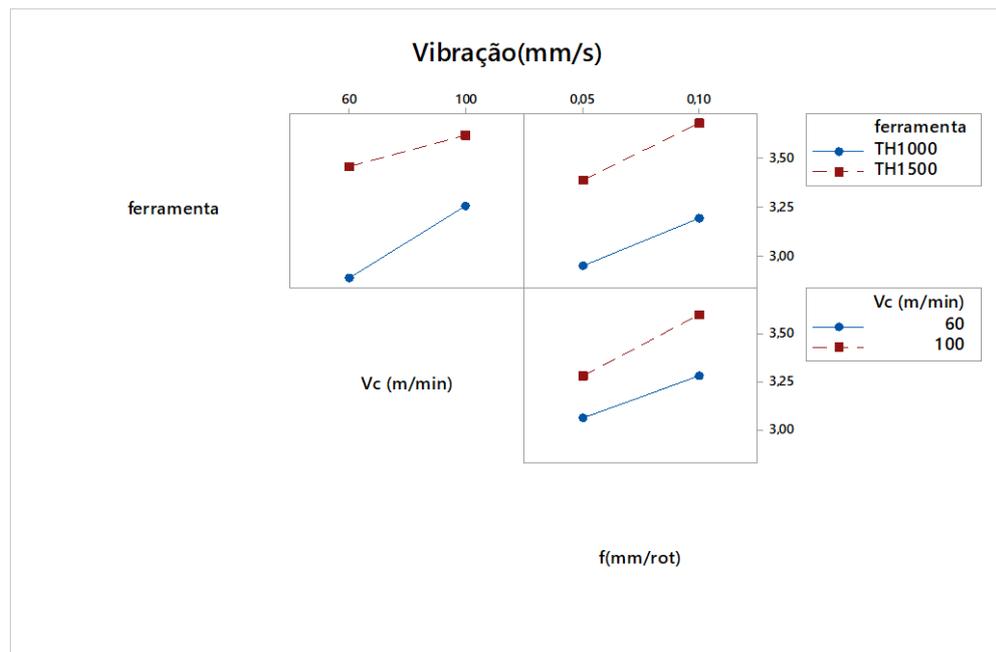
A figura 54 apresenta os efeitos causados pelos fatores ferramenta (TH1000 e TH1500), avanço e velocidade de corte em relação à média da vibração durante o torneamento dos corpos de prova de aço AISI 52100 e, na figura 55, é possível observar a influência das interações de segunda ordem.

Figura 54 – Média da vibração gerada durante os ensaios



Fonte: Autor.

Figura 55 – Influência das interações dos parâmetro sobre a vibração gerada durante o ensaio



Fonte: Autor.

Através da figura 54 é possível verificar de forma visual a influência dos parâmetros de corte, confirmando os dados obtidos no software *Minitab* e apresentados no quadro 10. É perceptível que a velocidade de corte e o avanço demonstraram uma grande influência na variável de saída, assim como no caso da potência de corte, entretanto, no caso da vibração é possível inferir que a ferramenta também apresenta uma influência tão grande quanto os outros parâmetros citados. Quanto menor a velocidade de corte e o avanço, há uma menor área de contato durante a usinagem, sendo assim, é gerado uma menor vibração. Já a influência da ferramenta de corte pode ser explicada pelo fato de a TH1000 (PVD) tratar-se de uma ferramenta de dureza superior, sendo assim, o seu atrito durante a usinagem tende a ser menor e, conseqüentemente, o seu desgaste e a vibração gerada.

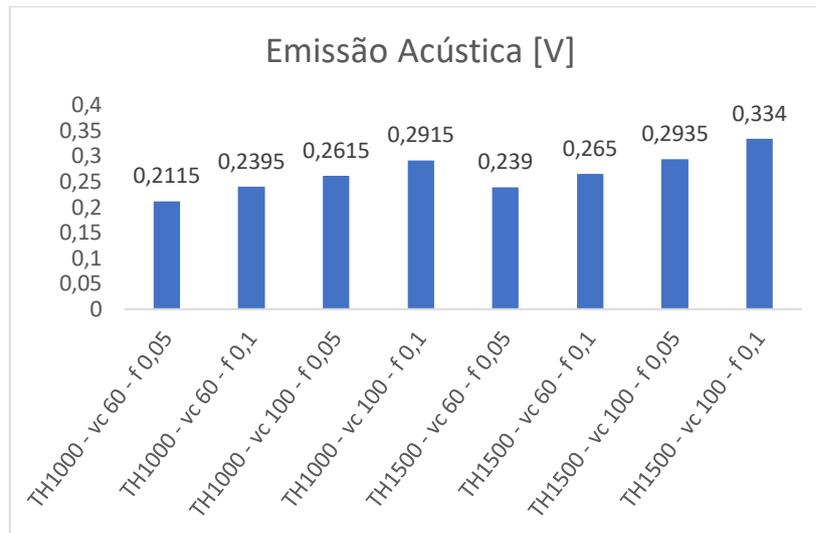
A figura 55 por sua vez, é a representação gráfica da sinergia entre dois parâmetros, ou seja, parâmetros que tiveram uma significância estatística quando combinados entre si. Quando as linhas dos gráficos se cruzam, ou tem uma tendência a se cruzarem, podemos dizer que elas apresentam uma interação. No entanto, os gráficos podem não apresentar a informação de forma tão sensíveis e perceptível quanto o valor de valor-P apresentados no quadro 10, contudo, neste caso, é possível observar que o gráfico de ferramenta mais velocidade de corte apresenta uma tendência de cruzamento na parte superior. O gráfico de avanço mais velocidade de corte, apesar de não representar uma significância estatística (valor-P > 0,05), também apresenta uma tendência de cruzamento na parte inferior, isso pode ser explicado pelo valor de valor-F superior a 2, o que também confere a essa interação certa influência. Por outro lado, o gráfico de ferramenta mais avanço mostra duas retas praticamente paralelas, ou seja, não há interação significativa entre estes dois parâmetros.

Sendo assim, pela figura 54, é possível concluir que a combinação de parâmetros que gerou menor vibração durante o processo foi a ferramenta TH1000, o avanço de 0,05 mm/rot e a velocidade de corte de 60 m/min, assim como no caso da potência de corte.

5.3 PRINCIPAIS EFEITOS PARA A EMISSÃO ACÚSTICA

A figura 56 descreve a média dos valores de emissão acústica durante cada ensaio. Observa-se que a combinação ferramenta TH1000, $V_c = 60$ m/min e $f = 0,05$ mm/rot apresentou uma menor emissão acústica.

Figura 56 – Gráfico da média da emissão acústica durante os ensaios



Fonte: Autor.

No quadro 11 estão os dados obtidos através da análise de variância e das influências sobre a média. É possível concluir que todos os parâmetros lineares do quadro 11 influenciaram de forma significativa estatisticamente. Além disso, duas interações de segunda ordem também se mostraram significativas estatisticamente: ferramenta mais velocidade corte e velocidade de corte mais avanço, os parâmetros em questão estão evidenciados em amarelo no quadro 11.

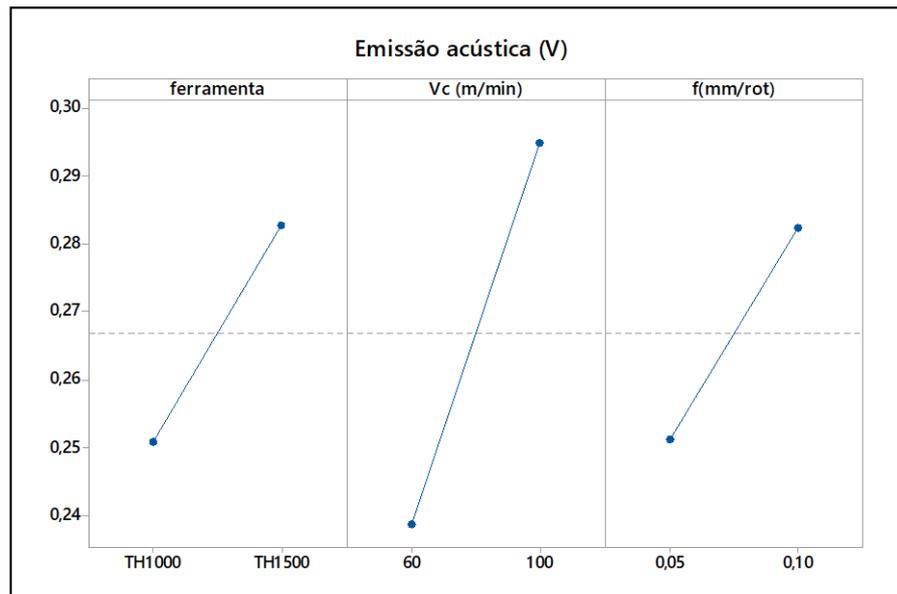
Quadro 11 – Dados da análise de variância para a emissão acústica

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor-F	Valor-P
Modelo	7	0,020742	0,002963	249,45	0,000
Linear	3	0,020501	0,006834	575,27	0,000
ferramenta	1	0,004045	0,004045	340,52	0,000
Vc (m/min)	1	0,012623	0,012623	1062,65	0,000
f (mm/rot)	1	0,003833	0,003833	322,65	0,000
Interações de 2ª ordem	3	0,000201	0,000067	5,63	0,023
ferramenta*Vc (m/min)	1	0,000110	0,000110	9,25	0,016
ferramenta*f (mm/rot)	1	0,000017	0,000017	1,40	0,271
Vc (m/min)*f (mm/rot)	1	0,000074	0,000074	6,24	0,037
Interações de 3ª ordem	1	0,000041	0,000041	3,43	0,101
ferramenta*Vc (m/min)*f (mm/rot)	1	0,000041	0,000041	3,43	0,101
Erro	8	0,000095	0,000012		
Total	15	0,020837			

Fonte: Autor.

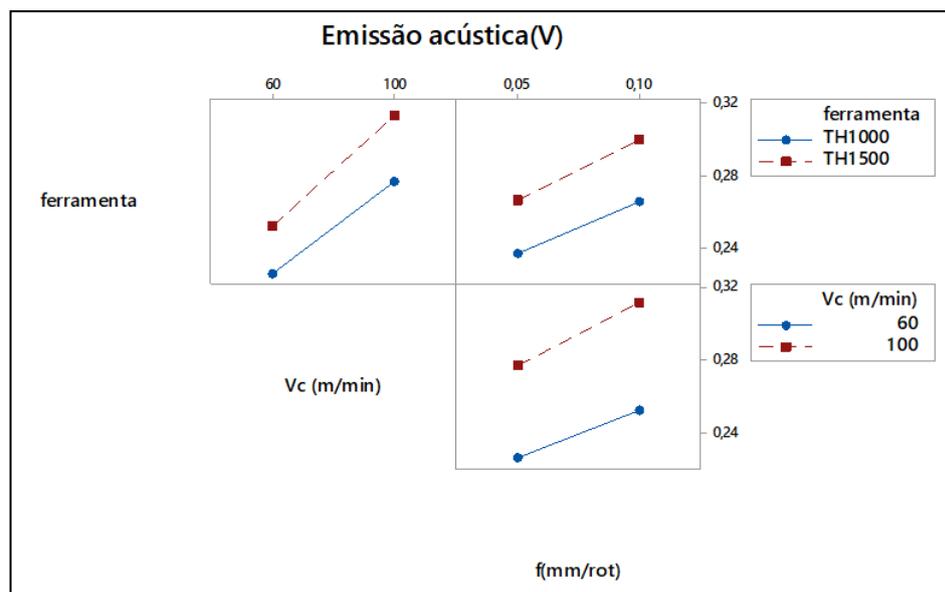
A figura 57 apresenta os efeitos causados pelos fatores ferramenta (TH1000 e TH1500), avanço e velocidade de corte em relação à média da emissão acústica durante o torneamento dos corpos de prova de aço AISI 52100 e, na figura 58, é possível observar a influência das interações de segunda ordem.

Figura 57 – Média da emissão acústica gerada durante os ensaios



Fonte: Autor.

Figura 58 – Influência das interações dos parâmetro sobre a emissão acústica gerada durante o ensaio



Fonte: Autor.

Através da figura 57 é possível verificar de forma visual a influência dos parâmetros de corte, confirmando os dados obtidos no software *Minitab* e apresentados no quadro 11. É perceptível que a velocidade de corte, o avanço e a ferramenta demonstraram uma grande influência na variável de saída, assim como no caso da vibração. Pode-se dizer que a vibração e a emissão acústica estão bem relacionados. Entretanto, a emissão acústica é uma variável complexa, já que ela pode ser oriunda de diversos fatores, ou seja, ela não é exclusiva do processo de usinagem. De maneira geral, quanto menor a velocidade de corte e o avanço, há uma menor área de contato durante a usinagem, sendo assim, é gerado uma menor emissão acústica. Já a influência da ferramenta de corte pode ser explicada pelo fato de a TH1000 (PVD) tratar-se de uma ferramenta de dureza superior, sendo assim, o seu atrito durante a usinagem tende a ser menor e, conseqüentemente, a sua emissão acústica. Normalmente, associa-se uma maior emissão acústica a uma usinagem mais complexa ou mais forte.

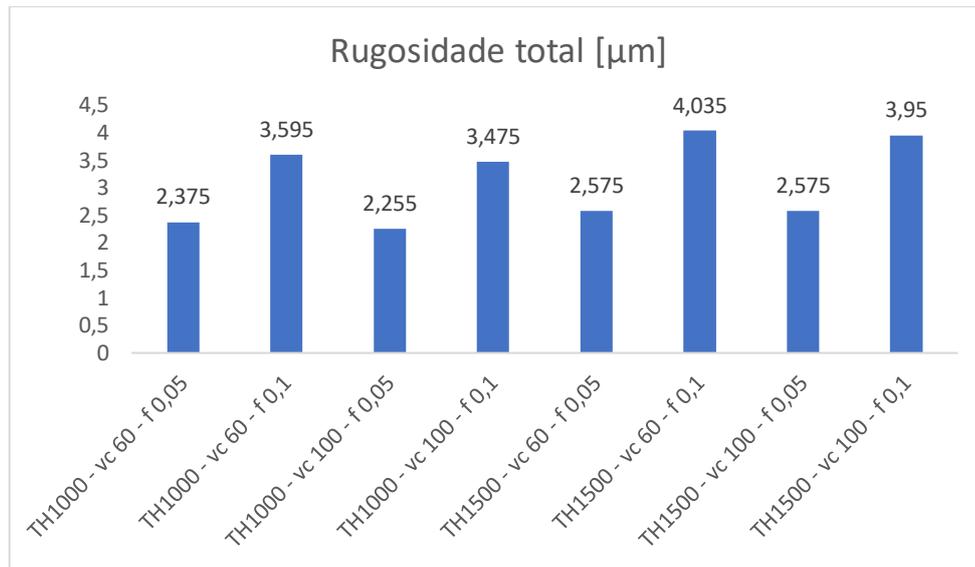
A figura 58 por sua vez, é a representação gráfica da sinergia entre dois parâmetros, ou seja, parâmetros que tiveram uma significância estatística quando combinados entre si. Quando as linhas dos gráficos se cruzam, ou tem uma tendência a se cruzarem, podemos dizer que elas apresentam uma interação. No entanto, os gráficos podem não apresentar a informação de forma tão sensíveis e perceptível quanto o valor de valor-P apresentados no quadro 11, como é o caso das combinações velocidade corte mais ferramenta e velocidade de corte mais avanço, em ambos os gráficos a tendência de cruzamento é sutil, sendo o primeiro caso um pouco mais visível devido ao seu menor valor de valor-P. Por outro lado, o gráfico de ferramenta mais avanço mostra duas retas praticamente paralelas, ou seja, não há interação significativa entre estes dois parâmetros.

Sendo assim, pela figura 57, é possível concluir que a combinação de parâmetros que gerou menor emissão acústica durante o processo foi a ferramenta TH1000, o avanço de 0,05 mm/rot e a velocidade de corte de 60 m/min, assim como no caso da potência de corte e da vibração.

5.4 PRINCIPAIS EFEITOS PARA A RUGOSIDADE TOTAL (RT)

A figura 59 descreve a média dos valores de rugosidade total durante cada ensaio. Observa-se que a combinação ferramenta TH1000, $V_c = 100$ m/min e $f = 0,05$ mm/rot apresentou uma menor rugosidade total.

Figura 59 – Gráfico da média da rugosidade total



Fonte: Autor.

No quadro 12 estão os dados obtidos através da análise de variância e das influências sobre a média. É possível concluir que todos os parâmetros lineares do quadro 12 influenciaram de forma significativa estatisticamente. Além disso, uma interação de segunda ordem também se mostrou significativa estatisticamente: ferramenta mais avanço, os parâmetros em questão estão evidenciados em amarelo no quadro 12.

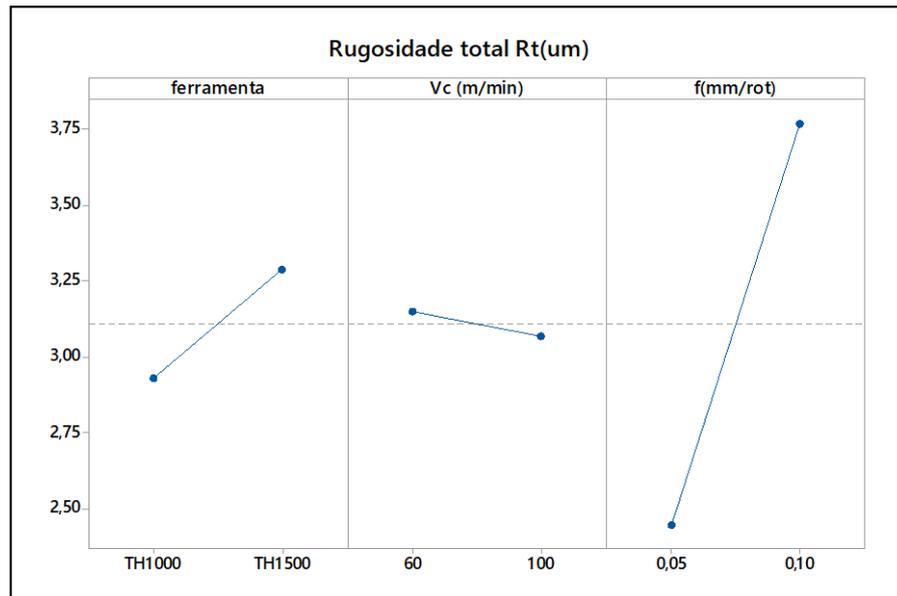
Quadro 12 – Dados da análise de variância para a rugosidade total

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor-F	Valor-P
Modelo	7	7,56393	1,08056	304,40	0,000
Linear	3	7,51499	2,50500	705,68	0,000
ferramenta	1	0,51142	0,51142	144,07	0,000
Vc (m/min)	1	0,02697	0,02697	7,60	0,025
f (mm/rot)	1	6,97660	6,97660	1965,38	0,000
Interações de 2ª ordem	3	0,04715	0,01572	4,43	0,041
ferramenta*Vc (m/min)	1	0,00604	0,00604	1,70	0,228
ferramenta*f (mm/rot)	1	0,03878	0,03878	10,92	0,011
Vc (m/min)*f (mm/rot)	1	0,00234	0,00234	0,66	0,440
Interações de 3ª ordem	1	0,00179	0,00179	0,50	0,498
ferramenta*Vc (m/min)*f (mm/rot)	1	0,00179	0,00179	0,50	0,498
Erro	8	0,02840	0,00355		
Total	15	7,59233			

Fonte: Autor.

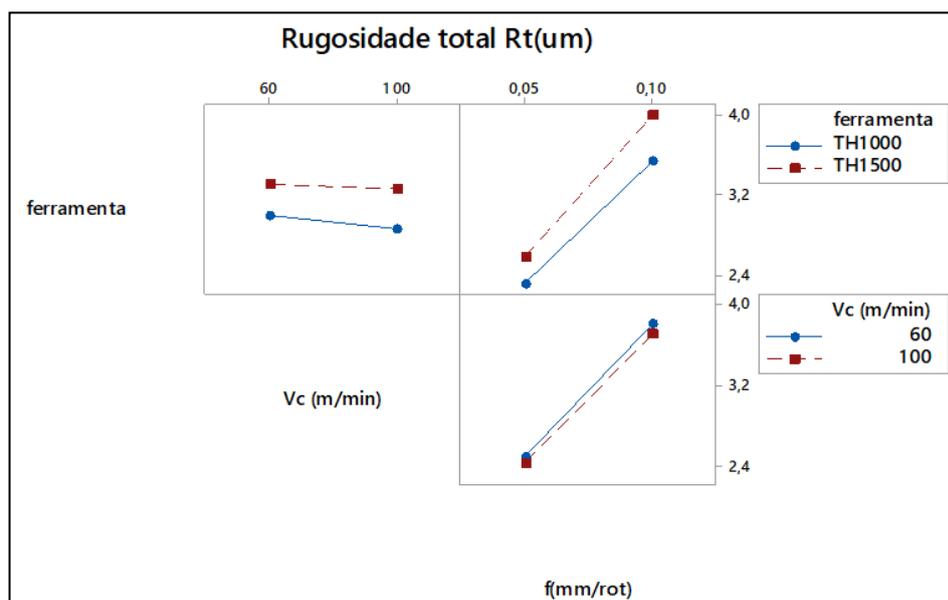
A figura 60 apresenta os efeitos causados pelos fatores ferramenta (TH1000 e TH1500), avanço e velocidade de corte em relação à média da rugosidade total durante o torneamento dos corpos de prova de aço AISI 52100 e, na figura 61, é possível observar a influência das interações de segunda ordem.

Figura 60 – Média da rugosidade total obtida durante os ensaios



Fonte: Autor.

Figura 61 – Influência das interações dos parâmetro sobre a rugosidade total obtida durante o ensaio



Fonte: Autor.

Através da figura 60 é possível verificar de forma visual a influência dos parâmetros de corte, confirmando os dados obtidos no software *Minitab* e apresentados no quadro 12. É perceptível que a velocidade de corte, o avanço e a ferramenta demonstraram uma grande influência na variável de saída. A influência da ferramenta de corte pode ser explicada pelo fato de a TH1000 (PVD) tratar-se de uma ferramenta de dureza superior, sendo assim, o seu atrito e a vibração durante a usinagem tendem a ser menores e, conseqüentemente, a rugosidade total. Em relação a velocidade corte, observa-se que quanto maior a velocidade, mais material passa pela ferramenta em um mesmo intervalo de tempo, isso causa um aumento da temperatura, o que tem um efeito benéfico neste caso, já que diminui a resistência do material e, conseqüentemente, culmina em um melhor acabamento superficial. A rugosidade total é sensível a defeitos pontuais e seu cálculo é feito através da diferença entre o ponto mais baixo e o mais alto medidos na superfície da peça usinada. A rugosidade é uma função direta do avanço, quanto maior o avanço, maior a rugosidade observada.

É importante ressaltar que, apesar de a ferramenta TH1000 apresentar um melhor desempenho neste caso, ambas as ferramentas estão dentro da faixa de retificação, ou seja, não é necessária uma retificação posterior. Por esta razão se justifica o uso de ambas as ferramentas, uma vez que, se fosse necessária uma retificação posterior, o processo não seria vantajoso do ponto de vista econômico.

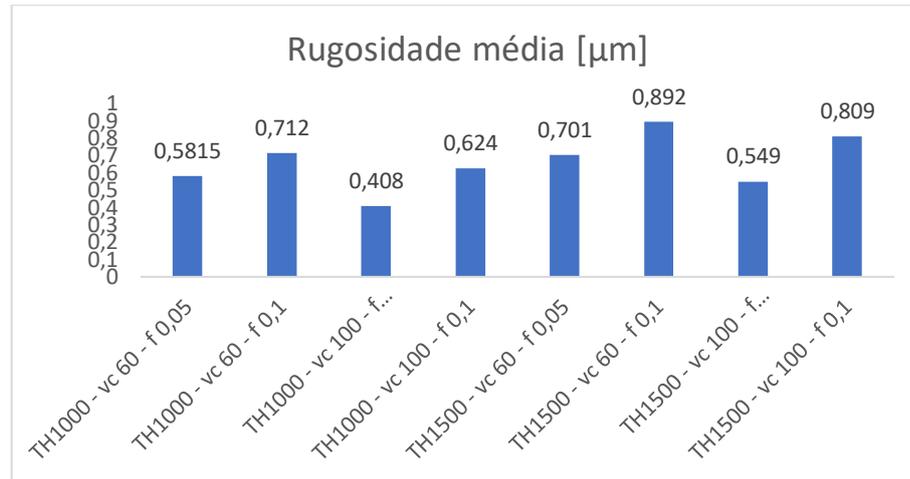
A figura 61 por sua vez, é a representação gráfica da sinergia entre dois parâmetros, ou seja, parâmetros que tiveram uma significância estatística quando combinados entre si. Quando as linhas dos gráficos se cruzam, ou tem uma tendência a se cruzarem, podemos dizer que elas apresentam uma interação. No entanto, os gráficos podem não apresentar a informação de forma tão sensíveis e perceptível quanto o valor de valor-P apresentados no quadro 12. Neste caso é possível observar que as retas do gráfico ferramenta mais avanço apresentam uma tendência de cruzamento na parte inferior, como já era esperado. Por outro lado, o gráfico de ferramenta mais velocidade de corte também apresenta uma leve tendência de cruzamento, a qual pode ser explicada devido ao valor de valor-F ser próximo de 2. Já as retas do gráfico de velocidade de corte mais avanço se mostram praticamente paralelas, o que reitera a sua não significância estatística.

Sendo assim, pela figura 60, é possível concluir que a combinação de parâmetros que gerou menor rugosidade total durante o processo foi a ferramenta TH1000, o avanço de 0,05 mm/rot e a velocidade de corte de 100 m/min.

5.5 PRINCIPAIS EFEITOS PARA A RUGOSIDADE MÉDIA (RA)

A figura 62 descreve a média dos valores de rugosidade média durante cada ensaio. Observa-se que a combinação ferramenta TH1000, $V_c = 100$ m/min e $f = 0,05$ mm/rot apresenta um menor valor de rugosidade média.

Figura 62 – Gráfico da média da rugosidade média



Fonte: Autor.

No quadro 13 estão os dados obtidos através da análise de variância e das influências sobre a média. É possível concluir que todos os parâmetros lineares do quadro 13 influenciaram de forma significativa estatisticamente, os parâmetros em questão estão evidenciados em amarelo no quadro 13. Não houve interações de segunda ordem significativas estatisticamente.

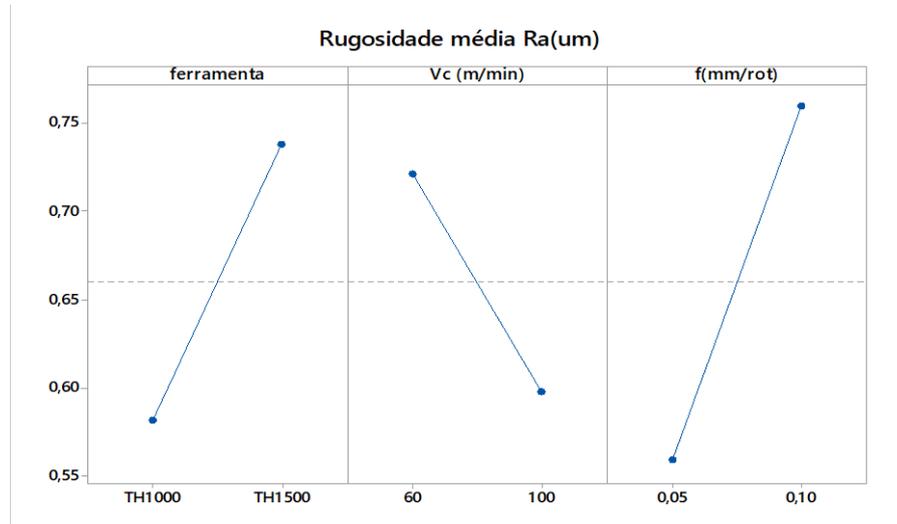
Quadro 13 – Dados da análise de variância para a rugosidade média

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor-F	Valor-P
Modelo	7	0,327442	0,046777	4,28	0,029
Linear	3	0,318513	0,106171	9,71	0,005
ferramenta	1	0,097625	0,097625	8,93	0,017
Vc (m/min)	1	0,061329	0,061329	5,61	0,045
f (mm/rot)	1	0,159559	0,159559	14,59	0,005
Interações de 2ª ordem	3	0,008866	0,002955	0,27	0,845
ferramenta*Vc (m/min)	1	0,000200	0,000200	0,02	0,896
ferramenta*f (mm/rot)	1	0,002705	0,002705	0,25	0,632
Vc (m/min)*f (mm/rot)	1	0,005961	0,005961	0,55	0,481
Interações de 3ª ordem	1	0,000063	0,000063	0,01	0,941
ferramenta*Vc (m/min)*f (mm/rot)	1	0,000063	0,000063	0,01	0,941
Erro	8	0,087474	0,010934		
Total	15	0,414916			

Fonte: Autor.

A figura 63 apresenta os efeitos causados pelos fatores ferramenta (TH1000 e TH1500), avanço e velocidade de corte em relação à média da rugosidade média durante o torneamento dos corpos de prova de aço AISI 52100.

Figura 63 – Média da rugosidade média obtida durante os ensaios



Fonte: Autor.

Através da figura 63 é possível verificar de forma visual a influência dos parâmetros de corte, confirmando os dados obtidos no software *Minitab* e apresentados no quadro 13. É perceptível que a velocidade de corte, o avanço e a ferramenta demonstraram uma grande influência na variável de saída. A influência da ferramenta de corte pode ser explicada pelo fato de que a TH1000 (PVD) tratar-se de uma ferramenta de dureza superior, sendo assim, o seu atrito e a vibração durante a usinagem tendem a ser menores e, conseqüentemente, a rugosidade média. Nota-se que, quando comparada com a rugosidade total, a ferramenta se mostrou mais influente na rugosidade média, uma vez que a rugosidade total leva em consideração detalhes pontuais. Em relação a velocidade corte, observa-se que quanto maior a velocidade, mais material passa pela ferramenta em um mesmo intervalo de tempo, isso causa um aumento da temperatura, o que tem um efeito benéfico neste caso, já que diminui a resistência do material e, conseqüentemente, culmina em um melhor acabamento superficial. A rugosidade média leva em consideração uma média dos resultados observados durante os ensaios, portanto tem-se algumas diferenças nos resultados quando comparados a aqueles analisados na rugosidade total. A rugosidade é uma função direta do avanço, quanto maior o avanço, maior a rugosidade observada.

É importante ressaltar que, apesar de a ferramenta TH1000 apresentar um melhor desempenho neste caso, ambas as ferramentas estão dentro da faixa de retificação, ou seja, não é necessária uma retificação posterior. Por esta razão se justifica o uso delas (assim como no caso da rugosidade total), uma vez que, se fosse necessária uma retificação posterior, o processo não seria vantajoso do ponto de vista econômico.

Sendo assim, pela figura 63, é possível concluir que a combinação de parâmetros que gerou menor rugosidade média durante o processo foi a ferramenta TH1000, o avanço de 0,05 mm/rot e a velocidade de corte de 100 m/min.

5.6 PRINCIPAIS EFEITOS PARA O DESGASTE DE FLANCO

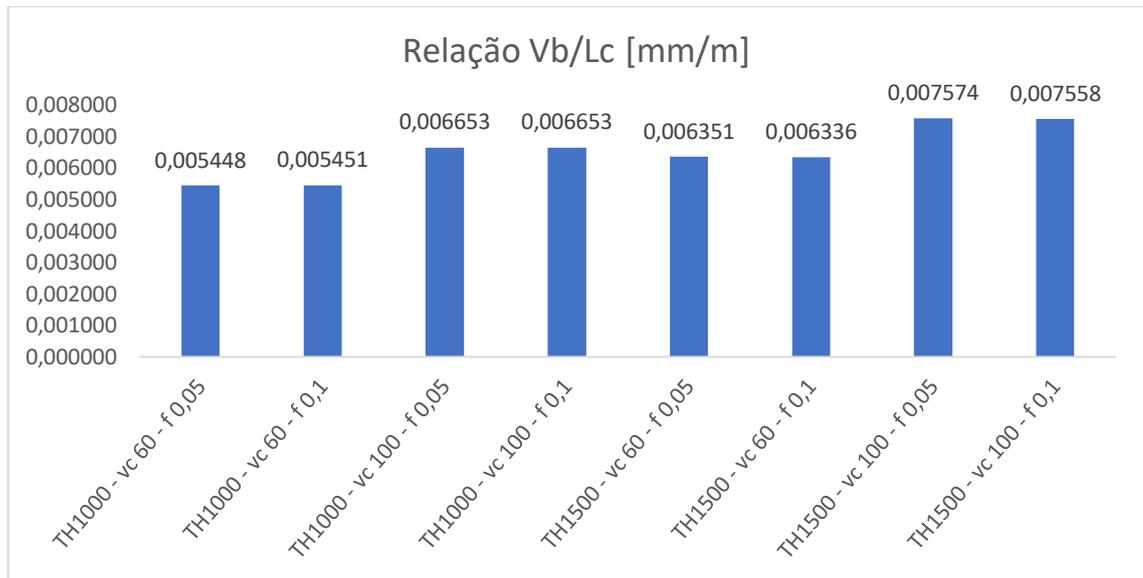
O desgaste referente a cada ferramenta (em cada uma das oito condições de ensaio) foi medido e dividido pelo comprimento usinado em cada ensaio, esses valores estão apresentados na tabela 6 e na figura 64, na qual é possível observar um comparativo entre cada uma das condições. O desgaste de flanco foi dividido pelo comprimento usinado de forma a compensar os valores e ter-se a possibilidade de comparação dos valores de cada ensaio, esse artifício foi utilizado a fim de compensar a impossibilidade de execução do ensaio de vida no laboratório. De maneira geral, é possível concluir que os menores níveis de desgaste se deram com a ferramenta TH1000 (PVD).

Tabela 6 – Dados de desgaste de flanco relativo, comprimento usinado e a relação entre eles

Condição	Desgaste medido Vb (em mm)	Comprimento Usinado Lc (em m)	Relação (em mm/m)
TH1000 - vc 60 - f 0,05	0,363	66,633	0,005448
TH1000 - vc 60 - f 0,1	0,181	33,207	0,005451
TH1000 - vc 100 - f 0,05	0,436	65,534	0,006653
TH1000 - vc 100 - f 0,1	0,218	32,767	0,006653
TH1500 - vc 60 - f 0,05	0,419	65,973	0,006351
TH1500 - vc 60 - f 0,1	0,209	32,987	0,006336
TH1500 - vc 100 - f 0,05	0,493	65,094	0,007574
TH1500 - vc 100 - f 0,1	0,246	32,547	0,007558

Fonte: Autor.

Figura 64 – Relação desgaste da ferramenta por comprimento usinado



Fonte: Autor.

No quadro 14 estão os dados obtidos através da análise de variância e das influências sobre a média. É possível concluir que o avanço e velocidade corte influenciaram de forma significativa estatisticamente, eles estão evidenciados em amarelo no quadro 14. Nenhuma interação de segunda ordem mostrou significância estatística.

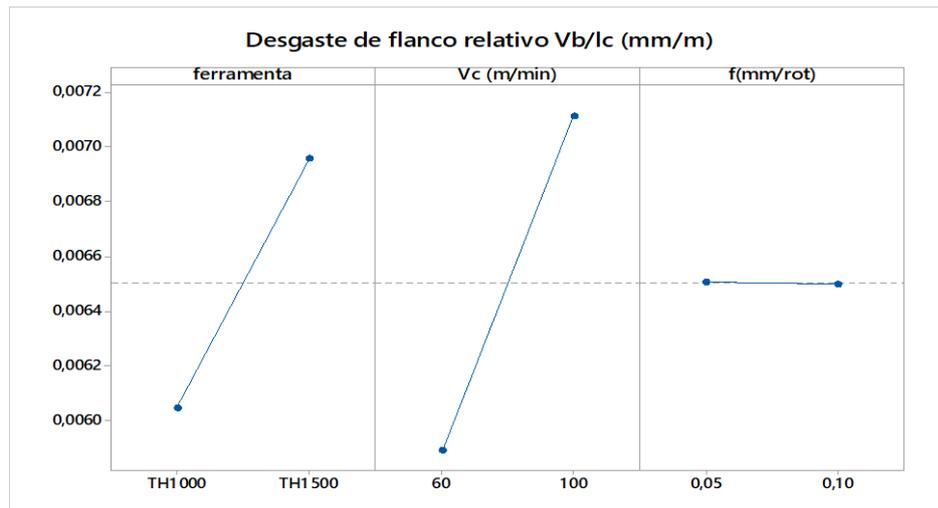
Quadro 14 – Dados da análise de variância para o desgaste de flanco relativo

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor-F	valor-P
Modelo	7	0,000009	0,000001	16975,24	0,000
Linear	3	0,000009	0,000003	39607,30	0,000
ferramenta	1	0,000003	0,000003	42485,11	0,000
Vc (m/min)	1	0,000006	0,000006	76333,09	0,000
f (mm/rot)	1	0,000000	0,000000	3,69	0,091
Interações de 2ª ordem	3	0,000000	0,000000	1,59	0,267
ferramenta*Vc (m/min)	1	0,000000	0,000000	3,10	0,116
ferramenta*f (mm/rot)	1	0,000000	0,000000	0,30	0,597
Vc (m/min)*f (mm/rot)	1	0,000000	0,000000	1,36	0,277
Interações de 3ª ordem	1	0,000000	0,000000	0,04	0,845
ferramenta*Vc (m/min)*f (mm/rot)	1	0,000000	0,000000	0,04	0,845
Erro	8	0,000000	0,000000		
Total	15	0,000009			

Fonte: Autor.

A figura 65 apresenta os efeitos causados pelos fatores ferramenta (TH1000 e TH1500), avanço e velocidade de corte em relação à média do desgaste de flanco relativo durante o torneamento dos corpos de prova de aço AISI 52100.

Figura 65 – Média do desgaste de flanco relativo ocasionado durante os ensaios



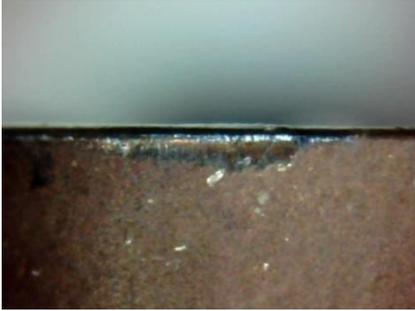
Fonte: Autor.

Através das figuras 65 é possível verificar de forma visual a influência dos parâmetros de corte, confirmando os dados obtidos no software *Minitab* e apresentados no quadro 14. É perceptível que a velocidade de corte e a ferramenta demonstraram uma grande influência na variável de saída, enquanto o avanço não apresentou influência, demonstrada pela linha praticamente horizontal no gráfico. O fato de o aumento do avanço causar um aumento de energia é compensado pelo aumento da área, ou seja, a energia tende a se distribuir, sendo assim o avanço não representa significância estatística para o caso do desgaste de flanco. Quanto menor a velocidade de corte, há uma menor área de contato e um menor atrito durante a usinagem, sendo assim, é gerado um menor desgaste de flanco. Já a influência da ferramenta de corte pode ser explicada pelo fato de a TH1000 (PVD) tratar-se de uma ferramenta de dureza superior, sendo assim, o seu atrito durante a usinagem tende a ser menor e, conseqüentemente, o seu desgaste.

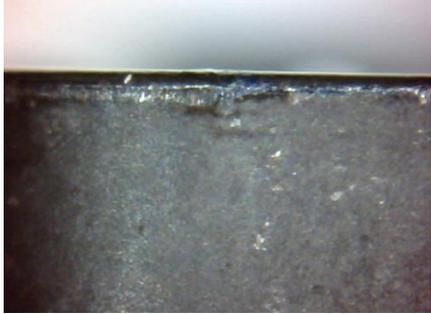
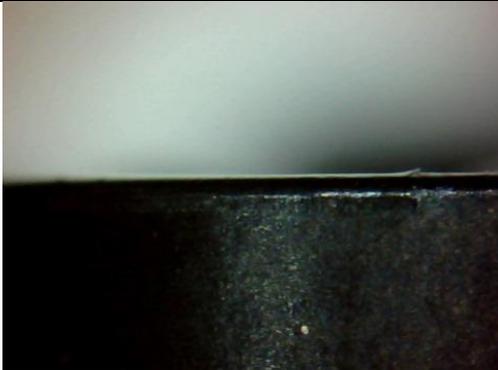
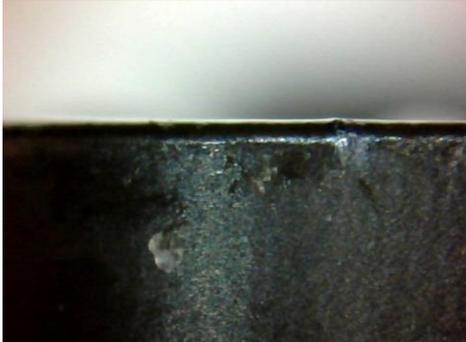
Sendo assim, pela figura 65, é possível concluir que a combinação de parâmetros que gerou menor desgaste de flanco durante o processo foi a ferramenta TH1000 e a velocidade de corte de 60 m/min, combinados com ambos os avanços.

O quadro 15 apresenta fotos do desgaste de flanco nas ferramentas utilizadas durante os ensaios.

Quadro 15 - Desgastes das ferramentas de corte ao final do processo com ampliação de 50x
(continua)

Condição de Usinagem	Aresta da ferramenta
<p>Experimento 1</p> <p>Ferramenta: TH1000 (PVD) $V_c = 100 \text{ m/min}$ $f = 0,1 \text{ mm/rot}$</p>	
<p>Experimento 2</p> <p>Ferramenta: TH1000 (PVD) $V_c = 100 \text{ m/min}$ $f = 0,05 \text{ mm/rot}$</p>	
<p>Experimento 3</p> <p>Ferramenta: TH1000 (PVD) $V_c = 60 \text{ m/min}$ $f = 0,1 \text{ mm/rot}$</p>	
<p>Experimento 4</p> <p>Ferramenta: TH1000 (PVD) $V_c = 60 \text{ m/min}$ $f = 0,05 \text{ mm/rot}$</p>	

Quadro 15 - Desgastes das ferramentas de corte ao final do processo com ampliação de 50x
(conclusão)

Condição de Usinagem	Aresta da ferramenta
<p>Experimento 5</p> <p>Ferramenta: TH1500 (CVD)</p> <p>$V_c = 100$ m/min</p> <p>$f = 0,1$ mm/rot</p>	
<p>Experimento 6</p> <p>Ferramenta: TH1500 (CVD)</p> <p>$V_c = 100$ m/min</p> <p>$f = 0,05$ mm/rot</p>	
<p>Experimento 7</p> <p>Ferramenta: TH1500 (CVD)</p> <p>$V_c = 60$ m/min</p> <p>$f = 0,1$ mm/rot</p>	
<p>Experimento 8</p> <p>Ferramenta: TH1500 (CVD)</p> <p>$V_c = 60$ m/min</p> <p>$f = 0,05$ mm/rot</p>	

Fonte: Autor.

Pelo quadro 15 é possível perceber o que foi constatado na análise estatística a respeito do avanço não exercer significância estatística. Entretanto, é importante ressaltar que o desgaste das imagens depende também do comprimento de corte usinado, por isso, ele não pode ser diretamente comparado aos dados de desgaste de flanco relativos da figura 65, uma vez que esta leva em consideração o valor do comprimento de corte. Outra informação importante é que neste trabalho não foi avaliado o desgaste de cratera, o qual é mais raro também.

De forma mais detalhada é possível observar que no experimento 1, 2, 3 e 4, nos quais tem-se a ferramenta TH1000, o desgaste prevalecente foi o desgaste de flanco, o qual é causado pelo atrito entre a peça a ser usinada e a superfície de folga da ferramenta. O desgaste de flanco é o esperado no processo de usinagem, mesmo se fossem otimizados os parâmetros ele estaria presente na ferramenta, por isso é possível dizer que o desgaste da ferramenta TH1000, combinada com ambas velocidades e avanços, está dentro do esperado na literatura. O único ponto de atenção está no experimento 1, no qual é possível observar um pequeno lascamento na parte direita. No experimento 2 há uma parte mais clara na imagem, mas esta não representa nenhum desgaste diferente, apenas um reflexo da luz do microscópio na imagem.

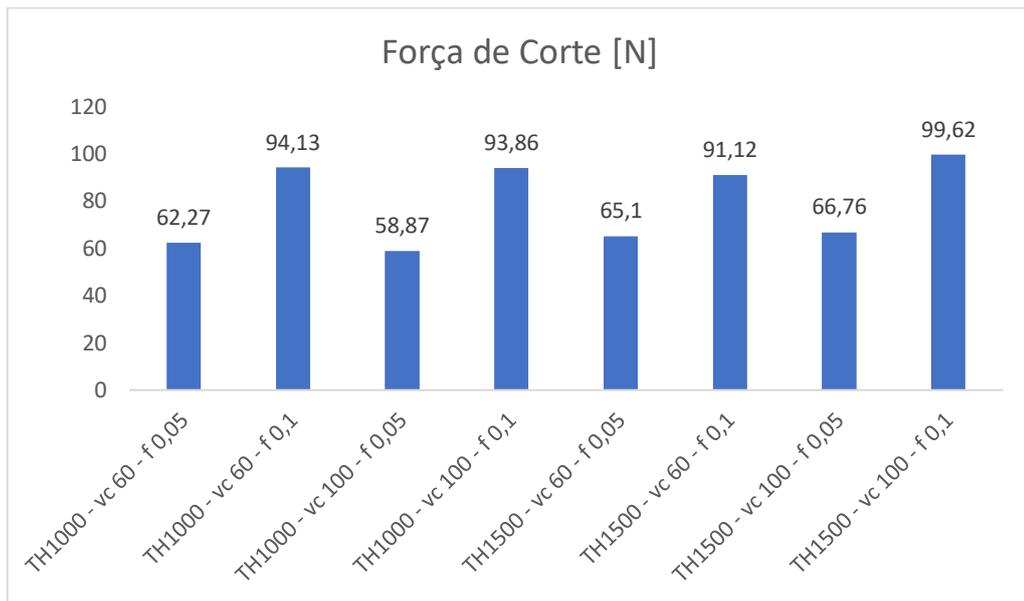
Já nos experimentos 5, 6 e 7, além do desgaste de flanco esperado, é possível observar alguns pontos nos quais ocorreu micro fragmentações. No experimento 5 é possível verificar que o desgaste de flanco ocorreu basicamente da metade para a parte esquerda da ferramenta, enquanto na parte direita tem-se pequenos lascamentos e uma fragmentação da aresta de corte. No experimento 6 e 8 observou-se um lascamento na parte central da ferramenta. No experimento 7 tem-se um agravante, é possível verificar que na parte direita houve um desgaste de entalhe, o qual é muito indesejado durante o processo de usinagem. A percepção do desgaste na ferramenta TH1500 foi um pouco mais complicada devido à qualidade das imagens feitas no microscópio e do contraste produzido pela cor da ferramenta.

De maneira geral é possível perceber pela análise das imagens que a ferramenta TH1000 se mostrou mais eficiente nos ensaios uma vez que seu desgaste foi mais homogêneo, já a ferramenta TH1500 apresentou danos mais heterogêneos e indesejados.

5.7 PRINCIPAIS EFEITOS PARA A FORÇA DE CORTE

A figura 66 descreve a média dos valores da força de corte durante cada ensaio. Observa-se que a combinação ferramenta TH1000, $V_c = 100$ m/min e $f = 0,05$ mm/rot apresentou a necessidade de menor força de corte durante a usinagem.

Figura 66 – Gráfico da média da força de corte



Fonte: Autor.

No quadro 16 estão os dados obtidos através da análise de variância e das influências sobre a média. É possível concluir que os parâmetros lineares: ferramenta e avanço do quadro 16 influenciaram de forma significativa estatisticamente. Além disso, uma interação de segunda ordem também se mostrou significativa estatisticamente: ferramenta mais velocidade corte, os parâmetros em questão estão evidenciados em amarelo no quadro 16.

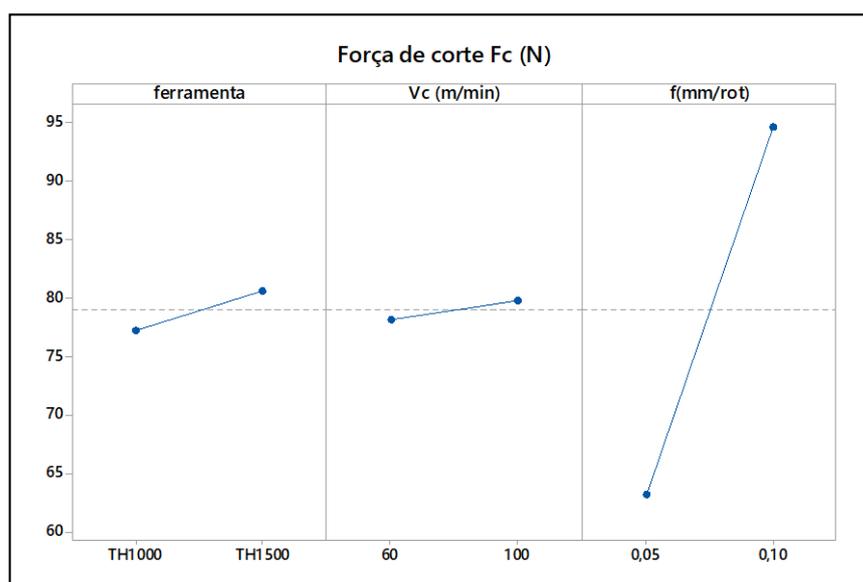
Quadro 16 – Dados da análise de variância para a força de corte

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor-F	Valor-P
Modelo	7	4099,33	585,62	70,55	0,000
Linear	3	4007,52	1335,84	160,94	0,000
ferramenta	1	45,32	45,32	5,46	0,048
Vc (m/min)	1	10,52	10,52	1,27	0,293
f (mm/rot)	1	3951,68	3951,68	476,08	0,000
Interações de 2ª ordem	3	88,39	29,46	3,55	0,067
ferramenta*Vc (m/min)	1	47,81	47,81	5,76	0,043
ferramenta*f (mm/rot)	1	15,85	15,85	1,91	0,204
Vc (m/min)*f (mm/rot)	1	24,73	24,73	2,98	0,123
Interações de 3ª ordem	1	3,42	3,42	0,41	0,539
ferramenta*Vc (m/min)*f (mm/rot)	1	3,42	3,42	0,41	0,539
Erro	8	66,40	8,30		
Total	15	4165,73			

Fonte: Autor.

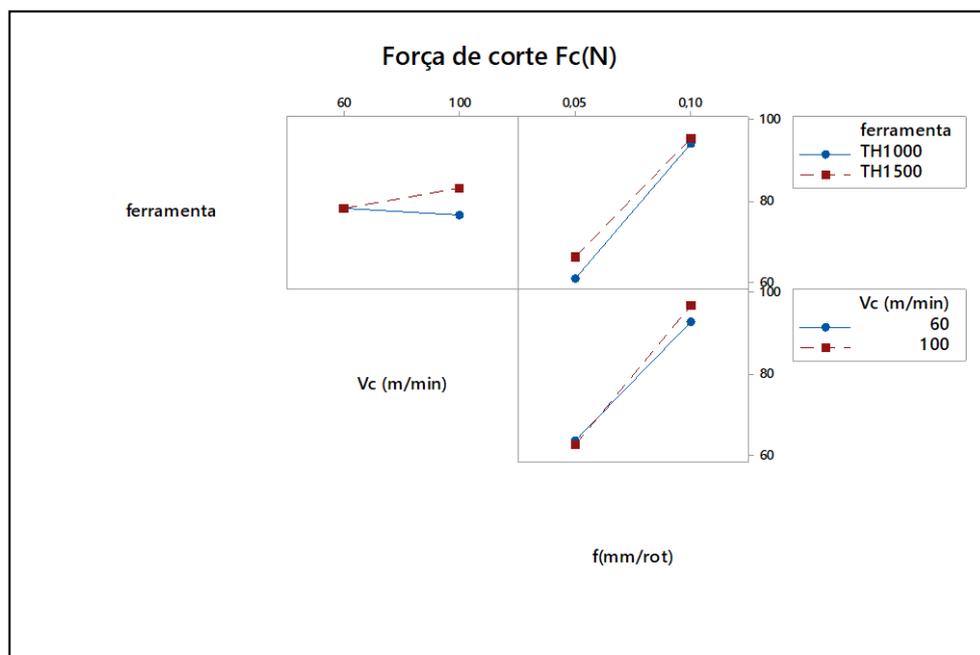
A figura 67 apresenta os efeitos causados pelos fatores ferramenta (TH1000 e TH1500), avanço e velocidade de corte em relação à média da força de corte durante o torneamento dos corpos de prova de aço AISI 52100 e, na figura 68, é possível observar a influência das interações de segunda ordem.

Figura 67 – Média da força de corte gerada durante os ensaios



Fonte: Autor.

Figura 68 – Influência das interações dos parâmetro sobre a força de corte gerada durante o ensaio



Fonte: Autor.

Primeiramente, é importante ressaltar que a força de corte não foi medida diretamente devido à falta de instrumentos de medição no laboratório. Sendo assim, a alternativa encontrada foi calcular a força de corte através da equação 10, utilizando-se da potência de corte média, a qual foi aferida durante os ensaios e as velocidades de corte são parâmetro pré-estabelecidos nesse caso.

Através da figura 67 é possível verificar de forma visual a influência dos parâmetros de corte, confirmando os dados obtidos no software *Minitab* e apresentados no quadro 16. É perceptível que o avanço demonstrou uma grande influência na variável de saída, já a ferramenta teve uma significância estatística mais sutil, enquanto a velocidade de corte se manteve quase horizontal, ou seja, não teve uma significância estatística. De maneira geral, quanto menor o avanço, há uma menor área de contato durante a usinagem, sendo assim, é gerado menor atrito e, conseqüentemente, menor a força de corte utilizada. Já a influência da ferramenta de corte pode ser explicada pelo fato de a TH1000 (PVD) tratar-se de uma ferramenta de dureza superior, sendo assim, o seu atrito durante a usinagem tende a ser menor e, conseqüentemente, a força de corte utilizada. Normalmente, associa-se uma menor força de corte a uma maior velocidade de corte, já que, ao aumentar a velocidade, tem-se um

aquecimento da peça o que acarreta uma facilidade de usinagem e, conseqüentemente, o emprego de menos força durante o corte. Porém, a força de corte não pode ser considerada um parâmetro linear nos experimentos, já que há influência dos efeitos térmicos.

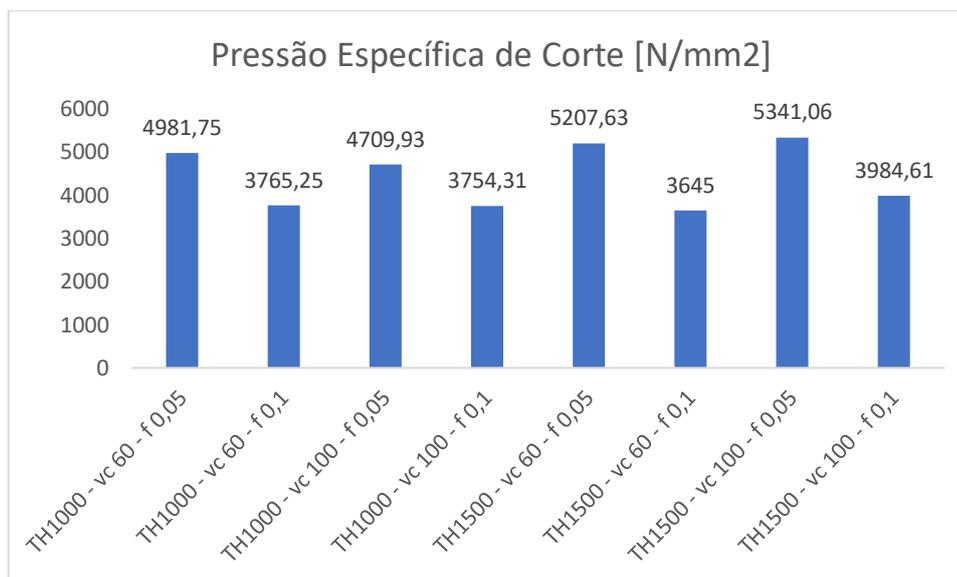
A figura 68 por sua vez, é a representação gráfica da sinergia entre dois parâmetros, ou seja, parâmetros que tiveram uma significância estatística quando combinados entre si. Quando as linhas dos gráficos se cruzam, ou tem uma tendência a se cruzarem, podemos dizer que elas apresentam uma interação. No entanto, os gráficos podem não apresentar a informação de forma tão sensíveis e perceptível quanto o valor de valor-P apresentados no quadro 16, neste caso, por exemplo, é possível observar que todas as interações apresentam em seus gráficos linhas que se cruzam, entretanto pelo quadro 16 tem-se que apenas a interação ferramenta com velocidade de corte apresentou uma interação com significância estatística. Esse caso pode ser explicado através da análise do parâmetro valor-F, o qual, quando maior que 2, simboliza que aquela combinação (ou interação) teve uma influência no processo, nos dois casos, ferramenta com avanço e velocidade de corte com avanço, o valor de valor-F está muito próximo ou maior que 2.

Sendo assim, pela figura 67, é possível concluir que a combinação de parâmetros que consumiu uma menor força de corte durante o processo foi a ferramenta TH1000, o avanço de 0,05 mm/rot e a velocidade de corte de 60 m/min, levando-se em conta, porém que a velocidade em si não apresentou uma influência significativa estatisticamente durante o processo de corte.

5.8 PRINCIPAIS EFEITOS PARA A PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

A figura 69 descreve a média dos valores pressão específica de corte durante cada ensaio. Observa-se que a combinação ferramenta TH1500, $V_c = 60$ m/min e $f = 0,1$ mm/rot apresentou uma menor pressão específica de corte durante a usinagem.

Figura 69 – Gráfico da média da pressão específica de corte



Fonte: Autor.

No quadro 17 estão os dados obtidos através da análise de variância e das influências sobre a média. É possível concluir que os parâmetros lineares: ferramenta e avanço do quadro 17 influenciaram de forma significativa estatisticamente. Os parâmetros em questão estão evidenciados em amarelo no quadro 17.

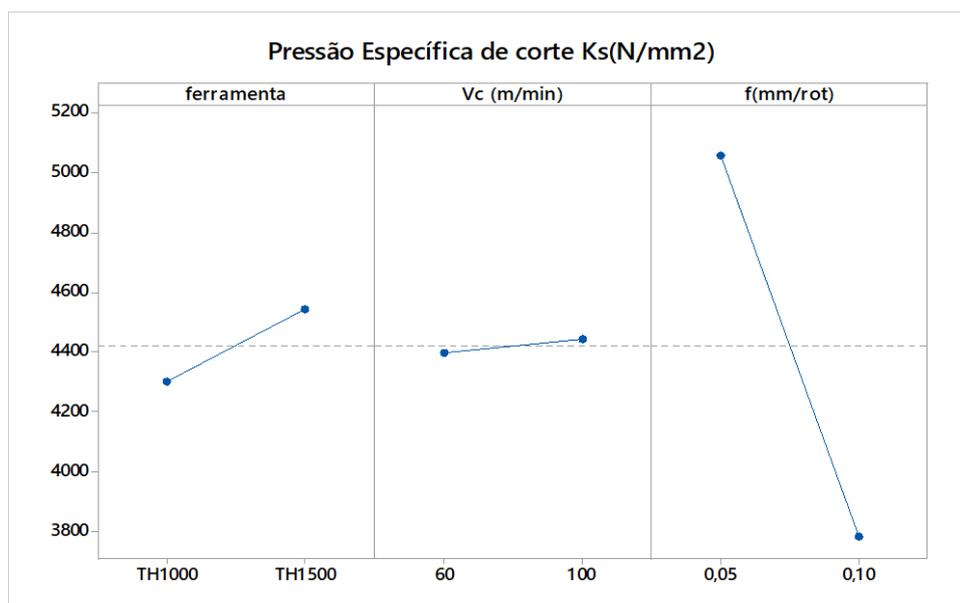
Quadro 17 – Dados da análise de variância para a pressão específica de corte

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor-F	Valor-P
Modelo	7	7060499	1008643	24,79	0,000
Linear	3	6722922	2240974	55,08	0,000
ferramenta	1	233801	233801	5,75	0,043
Vc (m/min)	1	9052	9052	0,22	0,650
f (mm/rot)	1	6480069	6480069	159,28	0,000
Interações de 2ª ordem	3	336830	112277	2,76	0,112
ferramenta*Vc (m/min)	1	142807	142807	3,51	0,098
ferramenta*f (mm/rot)	1	139486	139486	3,43	0,101
Vc (m/min)*f (mm/rot)	1	54537	54537	1,34	0,280
Interações de 2ª ordem	1	747	747	0,02	0,896
ferramenta*Vc (m/min)*f (mm/rot)	1	747	747	0,02	0,896
Erro	8	325460	40683		
Total	15	7385960			

Fonte: Autor.

A figura 70 apresenta os efeitos causados pelos fatores ferramenta (TH1000 e TH1500), avanço e velocidade de corte em relação à média da pressão específica de corte durante o torneamento dos corpos de prova de aço AISI 52100.

Figura 70 – Média da pressão específica de corte gerada durante os ensaios



Fonte: Autor.

Primeiramente, é importante ressaltar que a pressão específica de corte não foi medida diretamente devido à falta de instrumentos de medição no laboratório. Sendo assim, a alternativa encontrada foi calcular a pressão de corte através da equação 11, uma vez que a força de corte foi também calculada e o avanço e a profundidade de usinagem são parâmetros pré-estabelecidos nesse caso.

Através da figura 70 é possível verificar de forma visual a influência dos parâmetros de corte, confirmando os dados obtidos no software *Minitab* e apresentados na quadro 17. É perceptível que o avanço demonstrou uma grande influência na variável de saída, já a ferramenta teve uma significância estatística mais sutil, enquanto a velocidade de corte se manteve quase horizontal, ou seja, não teve uma significância estatística, assim como na força de corte. De maneira geral, quanto maior o avanço, há uma maior área de contato durante a usinagem. Sabendo que a pressão é inversamente proporcional a área, tem-se que quanto maior o avanço, menor a pressão específica de corte. Já a influência da ferramenta de corte pode ser explicada pelo fato de a TH1000 (PVD) tratar-se de uma ferramenta de dureza

superior, sendo assim, o seu atrito e a força de corte utilizada tendem a ser menores e, conseqüentemente, a pressão específica de corte.

De acordo com Mitsubishi (2007), a pressão específica de corte do aço AISI 52100 a um avanço de 0,1mm/rot deve ser em torno de 4500 N/mm², sendo assim, é possível constatar que os valores dos ensaios estavam dentro do esperado. A pressão específica de corte mais elevada representa uma usinabilidade pior, ou seja, quando maior a pressão, maior é a força de corte necessária. A pressão depende também de alguns outros fatores como fluido de corte e geometria da ferramenta. No caso dos experimentos analisados, é possível concluir que a ferramenta TH1000 se desempenhou melhor e, conseqüentemente, apresentou um corte mais facilitado.

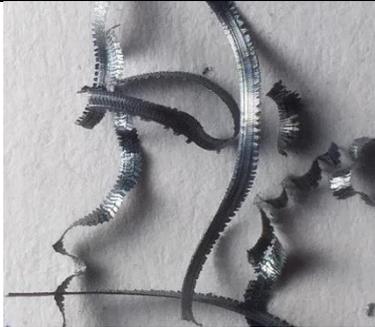
Sendo assim, pela figura 70, é possível concluir que a combinação de parâmetros que apresentou uma menor pressão específica de corte durante o processo foi a ferramenta TH1000, o avanço de 0,1 mm/rot e a velocidade de corte de 60 m/min, levando-se em conta, porém que a velocidade em si não apresentou uma influência significativa estatisticamente durante o processo de corte.

5.9 TIPOS E FORMAS DE CAVACO

Os cavacos formados nos ensaios realizados são todos considerados de cisalhamento, com a formação de lamelas e aspecto serrilhado nas bordas. A classificação das formas de cavacos foi feita tomando como base a figura 8 e estão apresentadas ao lado das respectivas fotos no quadro 18, sendo que as fotos mais detalhadas foram tiradas com a ampliação de 10x no microscópio nas fotos da esquerda (Cavaco inteiro) e 100x nas fotos da direita (cavaco mais ampliado).

Quadro 18 – Imagens e classificação dos cavacos formados em cada processo

(continua)

Condição de Usinagem e Classificação do Cavaco	Imagem do Cavaco
<p>Experimento 1</p> <p>Ferramenta: TH1000 (PVD) $V_c = 100$ m/min $f = 0,1$ mm/rot Cavaco em fita emaranhado</p>	
<p>Experimento 2</p> <p>Ferramenta: TH1000 (PVD) $V_c = 100$ m/min $f = 0,05$ mm/rot Cavaco em fita longo</p>	
<p>Experimento 3</p> <p>Ferramenta: TH1000 (PVD) $V_c = 60$ m/min $f = 0,1$ mm/rot Cavaco em fita emaranhado</p>	
<p>Experimento 4</p> <p>Ferramenta: TH1000 (PVD) $V_c = 60$ m/min $f = 0,05$ mm/rot Cavaco em fita emaranhado</p>	

Quadro 18 – Imagens e classificação dos cavacos formados em cada processo

(conclusão)

Condição de Usinagem e Classificação do Cavaco	Imagem do Cavaco
<p>Experimento 5</p> <p>Ferramenta: TH1500 (CVD) $V_c = 100$ m/min $f = 0,1$ mm/rot Cavaco em fita emaranhado</p>	
<p>Experimento 6</p> <p>Ferramenta: TH1500 (CVD) $V_c = 100$ m/min $f = 0,05$ mm/rot Cavaco em fita longo</p>	
<p>Experimento 7</p> <p>Ferramenta: TH1500 (CVD) $V_c = 60$ m/min $f = 0,1$ mm/rot Cavaco em fita longo</p>	
<p>Experimento 8</p> <p>Ferramenta: TH1500 (CVD) $V_c = 60$ m/min $f = 0,05$ mm/rot Cavaco em fita emaranhado</p>	

Fonte: Autor.

De acordo com Machado et al. (2011), o cavaco de cisalhamento pode ser originado em função das altas temperaturas atingidas durante o processo de usinagem e devido à velocidade de deformação. Isso acontece pois há uma diminuição da resistência mecânica do material, a qual se iguala ou excede a resistência do material resultante do tratamento térmico.

Nos ensaios observou-se que os cavacos apresentaram um tom azulado, isso se deve ao fato deles terem atingido temperaturas superiores a 850°C e depois terem resfriado. Esse fato era esperado pois trata-se de um aço endurecido e uma ferramenta negativa (ou seja, com um ângulo de saída negativo). As fotos microscópicas não foram tiradas de todos os cavacos pois observou-se uma semelhança entre eles, ou seja, todos tinham claro as lamelas e as bordas serrilhadas, o que caracteriza o cavaco de cisalhamento.

Outro ponto observado é que os cavacos não obedeceram aos efeitos mostrados na Figura 9, ou seja, conforme o aumento do avanço, os cavacos dos ensaios não tenderam a ficar mais curtos, menos emaranhados ou quebrarem mais. Por exemplo, quando comparamos os experimentos 5 e 6, é possível observar que o experimento 6 ($f = 0,05$ mm/rot) apresentou cavacos menos emaranhados do que os do experimento 5 ($f = 0,1$ mm/rot). Isso se deve ao fato que os parâmetros utilizados serem um pouco divergente dos recomendados, foi utilizada uma profundidade de corte pequena e o aumento do avanço era muito baixo se comparado ao raio de ponta da ferramenta. Dessa forma, a comparação com a teoria não se mostrou muito satisfatória.

As lamelas dos cavacos ficaram mais aparentes com o aumento da velocidade de corte e do avanço, mas não se observou a quebra dos cavacos devido a ductilidade do material ensaiado, aos parâmetros utilizados e a temperatura alta a qual o cavaco foi submetido.

Diniz et al. (2013) traz a informação de que os cavacos em fitas apresentam alguns problemas relacionados ao fato de ocuparem um maior espaço. Eles são mais difíceis de serem transportados e podem provocar acidentes. Além disso, se comparado ao cavaco helicoidal, ele interfere mais no acabamento superficial da peça usinada. Outro ponto importante é que os cavacos mais longos tendem a demandar um maior esforço de corte e, conseqüentemente, maior consumo de potência.

6 CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados, sejam eles estatísticos ou visuais, foi possível chegar as seguintes conclusões:

- ✓ A ferramenta com cobertura PVD obteve os melhores resultados, com menor nível de desgaste de flanco e desgastes mais homogêneos, ou seja, praticamente não apresentou desgastes além do desgaste de flanco, menor rugosidade, menor consumo de potência do motor, menor emissão acústica e menores vibrações;
- ✓ Entretanto ambas as ferramentas apresentaram resultados de rugosidade dentro da faixa de retificação, ou seja, não precisariam ser retificadas após o corte.
- ✓ O consumo de potência aumentou com o aumento da velocidade de corte e avanço, sendo que a ferramenta apresentou uma menor influência;
- ✓ De maneira geral, o avanço é o fator que mais influenciou o aumento da rugosidade média, do consumo de potência e no desgaste das ferramentas. O melhor acabamento da peça usinada e maior durabilidade, pode ser obtido através do avanço de 0,05mm/rot em ambas as ferramentas;
- ✓ A velocidade de corte de 60 m/min foi a mais vantajosa em todos os parâmetros, exceto na rugosidade média e total, nas quais a velocidade de 100m/min provocou um melhor acabamento superficial.
- ✓ Constatou-se que a pressão específica de corte estava dentro do valor esperado pela literatura, 4500 N/mm², além disso foi possível perceber que a ferramenta TH1000 e o avanço de 0,1mm/rot possibilitaram um melhor desempenho e, conseqüentemente, um corte mais facilitado.
- ✓ Os cavacos gerados foram todos de cisalhamento e do tipo fita, com comprimento longo, o que pode ser prejudicial na usinagem.

Baseando-se em todos os resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que a ferramenta de metal duro TH1000 com revestimento TiAlSiN pelo processo PVD, possibilitou um melhor desempenho e melhor acabamento superficial no processo de torneamento do aço AISI 52100 temperado.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como forma de complementar e ampliar o trabalho apresentado, tem-se como sugestão:

A análise e estudo mais aprofundado do desgaste em todas as superfícies da ferramenta de corte (como por exemplo, o desgaste de cratera, o qual não foi avaliado neste trabalho), a fim de compreender a influência do material e dos parâmetros de corte na ferramenta como um todo;

Outra sugestão seria a medição da força de corte de forma direta, através do uso de um dinamômetro, a fim de avaliar os resultados obtidos e comparar com os que foram calculados a partir da potência de corte neste trabalho;

Seria interessante também avaliar a usinabilidade do material utilizando-se ferramentas do mesmo material e recobrimento, porém com geometrias ou quebra cavacos diferentes, assim seria possível entender a influência e significância estatística dessas variáveis durante o processo de usinagem, além disso, seria interessante o uso de diferentes tipos de recobrimentos, como o TiNAl.

Outro ponto que ajudaria ainda mais no entendimento do processo de usinagem e, principalmente, a entender o comportamento do material, seria a execução da análise metalográfica do aço AISI 52100, dessa forma, a análise dos resultados obtidos seria mais abrangente e detalhada.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, H. J. de. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/3791>. Acesso em: 22 out. 2020.
- ASM INTERNATIONAL. **ASM metal handbook**. Ohio: ASM International, 1985.
- BESWICK, J. M. The effect of chromium in high carbon bearing steels. **Metallurgical Transactions A**, Nova Iorque, v. 18, p. 1897-1906, 1987. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02647019>. Acesso em: 15 nov. 2020
- CALLISTER JÚNIOR, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CAMPBELL, S. A. **The science and engineering of microelectronic fabrication**. Oxford: Oxford University Press, 1996.
- CHAUDHARI, R. G.; HASHIMOTO, F. Process controls for surface integrity generated by hard turning. **Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 45, p. 15–18, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.357>. Acesso em: 20 ago. 2020.
- COSTA, A. F. da. **Análise comparativa de ferramentas revestidas por PVD e CVD no torneamento do aço ABNT 8620**. 2016. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Guaratinguetá, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/144680>. Acesso em: 25 nov. 2020.
- DAVIM, J. P. A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments. **Journal Of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 116, n. 2-3, p. 305-308, out. 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01063-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01063-9). Acesso em: 20 nov. 2020.
- DEARNLEY, P. A.; TRENT, E. M. Wear mechanisms of coated carbide tools. **Metals Technology**, Londres, v. 9, n. 1, p. 60-75, jan. 1982. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/030716982803285909>. Acesso em: 30 nov. 2020.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Avárias e desgastes da ferramenta**. 8. ed. São Paulo: Artilber, 2013.
- EDWARDS, R. **Cutting tools**. London: Institute of Materials (Great Britain), 1993.
- FERRARESI, D. **Usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.
- FONTANA, L. **Estudo da deposição de filmes de Ti e TiN e desenvolvimento do sistema modificado triodo magnetron sputtering**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/76999/139008.pdf?sequence=1>. Acesso em: 10 dez. 2020.

GOINDI, G. S.; SARKAR, P. Dry machining: a step towards sustainable machining - challenges and future directions. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 165, p. 1557-1571, 2017. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617316918>. Acesso em: 10 nov. 2020.

GUPTA, U.; KOHLI, A. Experimental investigation of surface roughness in dry turning of AISI 4340 alloy steel using PVD and CVD coated carbide inserts. **International Journal of Innovations Engineering Technology**, Taiwan, v. 4, n. 1, p. 94-103, Ago. 2014. Disponível em: <http://www.sudoc.fr/163891559>. Acesso em: 11 nov. 2020.

HANCHI, J.; KLAMECKI, B.E. Acoustic emission monitoring of the wear process. **Wear**, Lausanne, v. 145, n. 1, p. 1-27, abr. 1991. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(91\)90236-n](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(91)90236-n). Acesso em: 25 out. 2020

HOGMARK, S.; JACOBSON, S.; LARSSON, M. Design and evaluation of tribological coatings. **Wear**, Lausanne, v. 246, n. 1-2, p. 20-33, nov. 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(00\)00505-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(00)00505-6). Acesso em: 22 nov. 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3685**: tool life testing with point turning. 2. ed. Genebra: ISO, 1993.

JACOBSEN, L. S.; AYRE, R. S. **Engineering vibrations**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1956. p. 335-344.

KALPAKJIAN, S.; SCHIMID, S. R. **Manufacturing engineering and technology**. 6. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2009.

KANYANTA, V.; DORMER, A.; MURPHY, N.; INVANKOVIC, A. Impact fatigue fracture of polycrystalline diamond compact (PDC) cutters and the effect of microstructure. **International Journal of Refractory Metals And Hard Materials**, Oxford, v. 46, p. 145-151, set. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.06.003>. Acesso em: 15 nov. 2020.

KLOCKE, F.; EISENBLÄTTER, G. Dry cutting. **Annals of the CIRP**, Berna, v. 46, p. 519-526, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60877-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60877-4). Acesso em: 16 nov. 2020.

LAN, M. S.; DORNFELD, D. A. Acoustic emission and machining: process analysis and control. **Advanced Manufacturing Processes**, Nova Iorque, v. 1, n. 1, p. 1-21, jan. 1986. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10426918608953155>. Acesso em: 23 nov. 2020.

LUZGINOVA, N. **Microstructure and transformation kinetics in bainitic steels**. 2008. 168 f. Tese (Doutorado em Física) – Tomsk State University, Russia, 2008. Disponível em: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:8e8aed12-d176-47b5-aca5-ea7f2ace907f?collection=research>. Acesso em: 25 set. 2020.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos metais**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2011.

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. **Usinagem dos materiais**. 8. ed. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

MITSUBISHI. **Mitsubishi tooling technology**: level 1. North Carolina: Mitsubish Materiais, 2006.

MITSUBISHI. **Mitsubishi tooling technology**: level 2. North Carolina: Mitsubish Materiais, 2007.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011. Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/soldabilidade.pdf>. Acesso em: 26 out. 2020.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 5. ed. Danvers: John Wiley & Sons, 2001.

OERLIKON, B. **Processos à base de PVD**. Disponível em: <https://www.oerlikon.com/balzers/br/pt-br/portfolio/tecnologias-de-superficie/processos-a-base-de-pvd/>. Acesso em: 29 nov. 2020.

RAMOS, D. R. **Investigação de novas rotas de tratamentos térmicos em aço para rolamento**. 2010. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2011.tde-06122010-104555>. Acesso em: 20 out. 2020.

RANGWALA, S.; LIANG, S.; DORNFELD, D. Pattern recognition of acoustic emission signals during punch stretching. **Mechanical Systems And Signal Processing**, Londres, v. 1, n. 4, p. 321-332, out. 1987. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/0888-3270\(87\)90092-6](http://dx.doi.org/10.1016/0888-3270(87)90092-6). Acesso em: 15 out. 2020.

SALMON, S. C. **Fundamentals of grinding**: modern grinding process technology. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1992.

SANDVIK. **Catálogo de produtos para usinagem**: ferramentas para torneamento. Sandvick Coromant. 2020. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/api/publications/view?url=https%3A%2F%2Fcdn.sandvik.coromant.com%2Fpublications%2Fa66c1bd2-52c4-47e6-8024-6d99a70f3d22.pdf&fileName=c-2900-26.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2020.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber, 2007.

SECO. **Catálogo de torneamento SECO**. 2020. Disponível em: <https://www.secotools.com/article/84585?language=pt>. Acesso em: 15 dez. 2020.

SENTHILKUMAR, R.; VAIDYANATHAN, S.; SIVARAMAN, B. Thermal analysis of heat pipe using Taguchi method. **International Journal of Engineering Science and**

- Technology**, Lagos, v. 2, n. 4, p. 564–569, 2010. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.189.468>. Acesso em: 27 out. 2020.
- SHAW, M. C. **Metal cutting principles**. 2. ed. Nova Iorque: Oxford university press New York, 2005. Disponível em: https://www.academia.edu/download/51746613/Metal_Cutting_Principles_2nd_Edition_-_By_Milton_C._Shaw.pdf. Acesso em: 23 out. 2020.
- SWAHN, H. P.; BECKER, C.; VINGSBO, O. Martensite decay during rolling contact fatigue in ball bearings. **Metallurgical Transactions A**, Nova Iorque, v. 7, n. 8. p. 1099 – 1110, 1976. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02656592>. Acesso em: 13 out. 2020.
- SILVA NETO, J. C. **Metrologia e controle dimensional**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019. Disponível em: <http://eu-ireland-custom-media-prod.s3.amazonaws.com/Brasil/Downloads/14-10/9788535290387.pdf>. Acesso em: 14 out. 2020.
- SREEJITH, P. S.; NGOI, B. K. A. Dry machining of the future. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 101 n. 1-3, p. 287-291, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00445-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00445-3). Acesso em: 10 out. 2020.
- STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 5. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2001.
- SUMITOMO. **Electric hartmetall gmbh**. Catalogue 2014-2015. Itami-shi, Hyogo. 2015.
- THIELE, J. D.; MELKOTE, S. N. Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 94, p. 216-226. 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00111-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00111-9). Acesso em: 29 set. 2020.
- THOMSON, W. T. **Teoria da vibração com aplicações**. Rio de Janeiro: Interciências, 1978.
- TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. 4. ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=ZddI0df1EEcC&oi=fnd&pg=PP2&dq=TRENT,+E.+M.%3B+WRIGHT,+P.+K.+Metal+cutting.+&ots=OiYpTvFG_2&sig=7tGc_1wwnttcUVNIKR11N9A_840. Acesso em: 10 out. 2020.
- UNTERWEISER, P. M. **Heat treater's guide standard practices and procedures of steel**. 2. ed. Ohio: ASM International, 1995. Disponível em: https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/06400G_TOC.pdf. Acesso em: 23 out. 2020.
- WERTHEIM, R.; SIVAN, R.; PORAT, R.; BER, A. Characterization of CVD coated carbide layers and their thermal properties. **Cirp Annals**, Berna, v. 31, n. 1, p. 7-11, 1982. em: [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)63259-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)63259-4). Acesso em: 25 out. 2020.
- WILLIAMS, J. A. The action of the lubricants in metal cutting. **Journal Mechanical Engineering Science**. Newbury Park, v. 19, n. 5, p. 202-212, 1977. Disponível em: https://doi.org/10.1243/JMES_JOUR_1977_019_044_02. Acesso em: 20 out. 2020.