

VINÍCIUS MOURA COURA

**Avaliação comparativa sobre o uso de diferentes ferramentas no torneamento do aço
AISI 52100**

Vinícius Moura Coura

**Avaliação comparativa sobre o uso de diferentes ferramentas 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

C858a	Coura, Vinícius Moura Avaliação comparativa sobre o uso de diferentes ferramentas no torneamento do aço AISI 52100 / Vinícius Moura Coura – Guaratinguetá, 2022. 99 f. : il. Bibliografia: f. 96-99 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022. Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves 1. Usinagem. 2. Aço de alta resistência. 3 Processos de fabricação. I. Título. CDU 621.9
-------	--

VINICIUS MOURA COURA

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

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

Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



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



Prof. Dr. MARCEL YUZO KONDO
UNESP-FEG



Prof. Dr. IVAIR SANTOS
Membro Externo

DADOS CURRICULARES

VINÍCIUS MOURA COURA

NASCIMENTO	11.05.1998 – Pindamonhangaba / SP
FILIAÇÃO	Júlio Cezar Bustamante Coura Silvana Rodolpho de Moura Coura
2016/2022	Curso de Graduação Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

dedico este trabalho aos meus pais e ao meu irmão que, com muito carinho e apoio, sempre estiveram presentes na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, sem ele nada seria possível. Agradeço pela minha vida, minha família e meus amigos;

a todos os professores que me influenciaram na minha trajetória. Em especial ao Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves, meu orientador, com quem compartilhei minhas dúvidas e angústias acerca do tema. Sem a sua dedicação e incentivo, esta monografia não seria possível;

aos meus pais Júlio Cezar e Silvana, que sempre estiveram próximos em todas as etapas da vida e que jamais pouparam esforços para me ajudar.

ao meu irmão Guilherme pelos conselhos e companheirismo de sempre;

à minha namorada e companheira Larissa pela paciência e dedicação de sempre;

à todos os amigos, amigas que sempre estiveram do meu lado compartilhando suas experiências e conhecimento;

à todos os funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá por toda ajuda para que esse trabalho fosse concluído.

“O insucesso é apenas uma oportunidade
para recomeçar com mais inteligência.”
Henry Ford

RESUMO

A constante busca pelo aperfeiçoamento dos processos de fabricação, gera um desenvolvimento contínuo na área de usinagem dos materiais reduzindo os custos, aumentando a eficiência e restringindo os impactos ambientais. Dentro dessa área se destaca a busca por ferramentas mais apropriadas para cada necessidade. Ainda nesse contexto, a usinagem a seco e o recobrimento das ferramentas de corte estão sendo gradativamente mais estudados. Diante disso, este trabalho procurou confrontar a performance de duas ferramentas de diferentes materiais, uma de nitreto cúbico de boro e outra de metal duro com revestimento de $\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$, na usinagem do aço AISI 52100. O aço AISI 52100 apresenta diversas propriedades que o torna ótimo para a fabricação de componentes de precisão e rolamentos, além de possuir um baixo custo. Foram realizados dezesseis ensaios onde se determinou os valores dos seguintes parâmetros: potência de usinagem, rugosidade, vibração, emissão acústica, desgaste das ferramentas e os tipos e formação de cavacos. Também foram avaliados os efeitos gerados pela variação dos parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço) na rugosidade final aço. 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 captação de potência, vibração e emissão acústica, partindo de diferentes parâmetros de corte (velocidade de corte e avanço). Os corpos de prova de aço AISI 52100 foram usinados com velocidade de corte de 100 e 150 m/min e avanços de 0,05 e 0,1 mm/rot, tendo a profundidade de corte constante em 0,25mm. Em resumo, os resultados obtidos com esse trabalho expressam que a ferramenta de nitreto cúbico de boro (CBN) apresentou um melhor desempenho na usinagem do aço AISI 52100 para os parâmetros analisados. Com a utilização da análise de variância notou-se que o menor valor de rugosidade foi obtido com a ferramenta de CBN a uma velocidade de corte de 150 m/min e avanço de 0,05 mm/rot.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem. CBN. Metal duro. Rugosidade. Recobrimento. AISI 52100.

ABSTRACT

The constant search for the improvement of the manufacturing processes, generates a continuous development in the area of machining of materials, reducing costs, increasing efficiency and restricting environmental impacts. Within this area, the search for the most appropriate tools for each need stands out. Still in this context, dry machining and coating of cutting tools are being gradually more studied. Therefore, this work sought to compare the performance of two tools made of different materials, one made of cubic boron nitride and the other made of carbide coated with TiCN+Al₂O₃+TiN, in the machining of AISI 52100 steel, which makes it great for manufacturing precision components and bearings, as well as having a low cost. Sixteen tests were carried out in which the values of the following parameters were determined: machining power, roughness, vibration, acoustic emission, tool wear and the types and formation of chips. The effects generated by the variation of cutting parameters (cutting speed and feed) on the final roughness of the steel were also evaluated. The work was developed at the Laboratory of Machining Study of UNESP - Guaratinguetá, using a CNC turning center of the Romi brand, model GL 240M, with a data acquisition system for capturing power, vibration and acoustic emission, starting from different parameters. cutting speed (cutting speed and feed). The AISI 52100 steel specimens were machined with cutting speeds of 100 and 150 m/min and feeds of 0.05 and 0.1 mm/rev, with a constant cutting depth of 0.25 mm. In summary, the results obtained with this work show that the cubic boron nitride (CBN) tool showed a better performance in the machining of AISI 52100 steel for the analyzed parameters. Using analysis of variance, it was noted that the lowest roughness value was obtained with the CBN tool at a cutting speed of 150 m/min and feed of 0.05 mm/rev.

KEYWORDS: Machining. CBN. Coated carbide. Roughness. AISI 52100.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Categorização dos processos de fabricação	23
Figura 2 – Principais operações de torneamento	24
Figura 3 – Movimentos ativos no torneamento	25
Figura 4 – Relação do avanço com o acabamento superficial da peça	26
Figura 5 – Exemplos de corte ortogonal	27
Figura 6 – Mecanismo de formação de cavacos	28
Figura 7 – Classificação do formato de cavaco	30
Figura 8 – Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos	30
Figura 9 – Materiais disponíveis para ferramentas de corte.....	33
Figura 10 – Estrutura cristalina do HBN e do CBN	34
Figura 11 – Influência do teor de cobalto e da temperatura na dureza do metal duro	35
Figura 12 – Principais formas de desgaste e suas respectivas áreas nas ferramentas de corte	39
Figura 13 – Desgaste de flanco em uma ferramenta de corte	40
Figura 14 – Desgaste de entalhe em uma ferramenta de corte.....	40
Figura 15 – Desgaste de cratera em uma ferramenta de corte.....	41
Figura 16 – Distribuição dos mecanismos de desgaste.....	41
Figura 17 – Representação da aresta postiça de corte.....	42
Figura 18 – Variação da superfície usinada em função do avanço e da forma da ferramenta	44
Figura 19 – Rugosidade média (R_a).....	45
Figura 20 – Superfícies diferentes com o mesmo valor de R_a	46
Figura 21 – Rugosidade total (R_t).....	46
Figura 22 – Principais origens da emissão acústica na usinagem	49
Figura 23 – Amostra do sinal de emissão acústica	49
Figura 24 – Corpo de prova fixado ao Centro de Torneamento	51
Figura 25 – Ensaio com a ferramenta de CBN	52
Figura 26 – Ferramenta CBN utilizada	53
Figura 27 – Medidas da ferramenta de CBN da marca Seco	53
Figura 28 – Ferramenta com revestimento $TiCN+Al_2O_3+TiN$	54
Figura 29 – Ferramenta de metal duro com revestimento CVD da marca Sandvik	54
Figura 30 – Medidas da ferramenta de metal duro da Sandvik	55
Figura 31 – Centro de Torneamento CNC Romi modelo GL 240M	56
Figura 32 – Rugosímetro da marca Mahr modelo Marsurf M300.....	57

Figura 33 – Microscópio óptico da marca Mahr, modelo MarVision MM20	57
Figura 34 – Sensor de corrente, marca LEM modelo AT100 B10	58
Figura 35 – Sensor piezelétrico, marca Vibro Control, modelo TV100	60
Figura 36 – Sensor piezelétrico utilizado nos ensaios	60
Figura 37 – Módulo de emissão acústica (1), sensor (2) e amplificador (3).....	61
Figura 38 – Média da potência consumida para cada condição de entrada dos ensaios.....	64
Figura 39 – Média da potência consumida nos ensaios realizados	65
Figura 40 – Influência das interações de segunda ordem sobre a potência consumida nos ensaios realizados.....	65
Figura 41 – Média da vibração para cada condição de entrada dos ensaios	67
Figura 42 – Média da vibração nos ensaios realizados.....	68
Figura 43 – Influência das interações de segunda ordem sobre a vibração nos ensaios realizados	68
Figura 44 – Média da emissão acústica para cada condição de entrada dos ensaios.....	70
Figura 45 – Média da emissão acústica nos ensaios realizados	71
Figura 46 – Influência das interações de segunda ordem sobre a emissão acústica nos ensaios realizados.....	71
Figura 47 – Média da rugosidade total para cada condição de entrada dos ensaios.....	73
Figura 48 – Média da rugosidade total nos ensaios realizados	74
Figura 49 – Influência das interações de segunda ordem sobre a rugosidade total nos ensaios realizados.....	74
Figura 50 – Média da rugosidade média para cada condição de entrada dos ensaios	76
Figura 51 – Média da rugosidade média nos ensaios realizados.....	77
Figura 52 – Influência das interações de segunda ordem sobre a rugosidade média nos ensaios realizados.....	77
Figura 53 – Média da relação desgaste da ferramenta por comprimento usinado para cada condição de entrada dos ensaios	79
Figura 54 – Média do desgaste de flanco relativo nos ensaios realizados	80
Figura 55 – Influência das interações de segunda ordem sobre o desgaste de flanco relativo nos ensaios realizados	81
Figura 56 – Média da força de corte para cada condição de entrada dos ensaios	84
Figura 57 – Média da força de corte nos ensaios realizados	85
Figura 58 – Influência das interações de segunda ordem sobre a força de corte nos ensaios realizados.....	86

Figura 59 – Média pressão específica de corte para cada condição de entrada dos ensaios ...	87
Figura 60 – Média da pressão específica de corte nos ensaios realizados	88
Figura 61 – Influência das interações de segunda ordem sobre a pressão específica de corte nos ensaios realizados	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Composição Química nominal do aço AISI 52100	22
Quadro 2 – Propriedades de camadas de revestimento.....	36
Quadro 3 – Parâmetros R_a e R_t de rugosidade.....	45
Quadro 4 – Condições de cada ensaio	62
Quadro 5 – Análise de variância para a potência de corte	64
Quadro 6 – Análise de variância para a vibração	67
Quadro 7 – Análise de variância para a emissão acústica.....	70
Quadro 8 – Análise de variância para a rugosidade total.....	73
Quadro 9 – Análise de variância para a rugosidade média	76
Quadro 10 – Análise de variância para o desgaste de flanco relativo	80
Quadro 11 – Desgastes das ferramentas de corte ao final do processo (ampliação de 500x). 84	
Quadro 12 – Análise de variância para a força de corte	85
Quadro 13 – Análise de variância para a pressão específica de corte	87
Quadro 14 – Imagens e classificação dos cavacos formados em cada ensaio	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço AISI 52100	51
Tabela 2 – Recomendações de uso para a ferramenta Seco CBN170, CNGA 120408E25	53
Tabela 3 – Recomendações de uso para a ferramenta da Sandvik	55
Tabela 4 – Variáveis de entrada	62
Tabela 5 – Desgaste de flanco relativo, comprimento usinado e a relação entre eles	79

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)
HBN	Nitreto Hexagonal de Boro
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

Al	Alumínio
AlTiN	Nitreto de alumínio titânio
AlTiSiN	Nitreto de titânio, alumínio e silício
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
a _p	Profundidade de corte
B	Boro
C	Carbono
Co	Cobalto
Cr	Cromo
CrN	Nitreto de cromo
Cu	Cobre
D	Diâmetro
f	Avanço em mm/rot
F _c	Força de corte
Fe	Ferro
Ff	Força de avanço
I	Corrente
K	Kelvin
Kt	Profundidade de cratera
Ks	pressão específica de corte
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
n	Rotação em rpm (η)
N	Nitrogênio
Ni	Níquel
P	Fósforo
Pc	Potência de corte
Pf	Potência de avanço
Pm	potência fornecida pelo motor
Si	Silício
Ra	Rugosidade média
Rt	Rugosidade total
rpm	Rotações por minuto
Rt	Rugosidade total
S	Enxofre
Ti	Titânio
TiAlN	Nitreto de titânio-alumínio
TiC	Carbeto de Titânio
TiCN	Carbonitreto de titânio
TiN	Nitreto de titânio
TiSiAlN	Nitreto de titânio alumínio e silício
V	Vanádio
VB	desgaste de flanco médio
VB _{máx}	Desgaste de flanco máximo
V _c	Velocidade de corte
V _f	Velocidade de avanço
W	Watt

W
WC

Tungstênio
Carbeto de Tungstênio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
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	PROCESSO DE USINAGEM.....	22
3.2.1	Torneamento	24
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 cavacos.....	29
3.2.3	Fluidos de Corte	31
3.2.3.1	Usinagem a seco.....	31
3.2.4	Materiais para ferramentas	32
3.2.4.1	Ferramenta de Nitreto Cúbico de Boro	33
3.2.4.2	Ferramenta de Metal Duro	34
3.2.4.3	Metal duro com recobrimento.....	35
3.2.4.4	Processo CVD.....	36
3.3	DESGASTE E AVARIA DE FERRAMENTA.....	37
3.3.1	Desgastes nas ferramentas de corte	38
3.3.1.1	Tipo de desgaste da ferramenta.....	39
3.3.1.2	Mecanismos de desgaste da ferramenta	41
3.4	ACABAMENTO SUPERFICIAL	43
3.4.1	Parâmetros para a quantificação da rugosidade.....	44
3.4.1.1	Rugosidade média (R_a).....	45
3.4.1.2	Rugosidade total (R_t)	46
3.5	POTÊNCIA DE USINAGEM	47
3.6	EMIÇÃO ACÚSTICA.....	48
3.7	VIBRAÇÃO.....	49
4	MATERIAIS E MÉTODOS	51
4.1	MATERIAL.....	51

4.2	CORPO DE PROVA.....	51
4.3	FERRAMENTAS DE CORTE.....	52
4.3.1	Ferramenta 1: Nitreto Cúbico de Boro do fabricante Seco Tools	52
4.3.2	Ferramenta 2: Metal Duro revestida por TiCN+Al₂O₃+TiN da Sandvik	54
4.4	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	55
4.4.1	Centro de Torneamento CNC	55
4.4.2	Rugosímetro.....	56
4.4.3	Microscópios.....	57
4.5	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	58
4.5.1	Potência de corte.....	58
4.5.2	Vibração.....	60
4.5.3	Emissão acústica.....	61
4.6	PROCEDIMENTOS E PROCESSO DE USINAGEM	61
4.7	TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE DADOS.....	62
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
5.1	EFEITOS PARA A POTÊNCIA DE CORTE.....	63
5.2	EFEITOS PARA A VIBRAÇÃO	66
5.3	EFEITOS PARA A EMISSÃO ACÚSTICA	69
5.4	EFEITOS PARA A RUGOSIDADE TOTAL (Rt).....	72
5.5	EFEITOS PARA A RUGOSIDADE MÉDIA (Ra)	75
5.6	EFEITOS PARA DESGASTE DE FLANCO	78
5.7	EFEITOS PARA A FORÇA DE CORTE	84
5.8	EFEITOS PARA A PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE	86
5.9	TIPOS E FORMAS DE CAVACO.....	89
6	CONCLUSÃO	93
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	95
	REFERÊNCIAS	96

1 INTRODUÇÃO

Com os grandes avanços tecnológicos ocorridos nos últimos anos o processo de usinagem, com foco nas ferramentas de corte, têm sido constantemente desenvolvidos. O objetivo é aumentar a produtividade e gerar um menor impacto ambiental. Para tal, novos materiais e recobrimentos têm sido apresentados e estudados.

O aço é normalmente utilizado em pesquisas e estudos, uma vez que são realizadas contínuas descobertas associadas ao ferro e suas ligas. Sendo essa a principal razão pela qual o aço é o material mais empregado na indústria, com mais de uma bilhão de toneladas consumidas anualmente. Neste trabalho, será utilizado o aço AISI 52100, que apresenta múltiplas propriedades que o tornam ideal para a fabricação de rolamentos e componentes de precisão, além de um baixo custo e propriedades mecânicas muito boas.

O grande desafio da usinagem a seco são as elevadas temperaturas geradas. Como consequência, tem-se elevadas cargas térmicas, e altos níveis de oxidação, difusão e abrasão da ferramenta utilizada. Fatores esses que contribuem para uma drástica redução da vida útil da ferramenta. Uma das alternativas para superar esse grande desafio é o uso de ferramentas com elevada resistência ao desgastes como ferramentas de CBN e de metal duro com recobrimento, que buscam conciliar dureza e tenacidade.

Como qualquer outro processo, a usinagem também possui desvantagens com relação a outros métodos de fabricação. Dentre esses, se destacam a menor a velocidade de produção e o custo elevado com a aquisição e manutenção do maquinário requerido. Diante disso, muitos estudos visam o aumento da produtividade desse processo mantendo-se níveis satisfatórios de qualidade. Por outro lado, pode-se destacar como vantagem da usinagem a possibilidade de obtenção de geometrias simples e complexas e o seu corte contínuo, o que acabam por justificar sua utilização.

Neste trabalho, serão analisados, para uma ferramenta de nitreto cúbico de boro e outra de metal duro revestido, os efeitos da velocidade de corte e do avanço na usinagem do aço AISI 52100.

2 OBJETIVO

2.1 GERAL

Avaliar a usinabilidade do aço AISI 52100 no processo de torneamento a seco através de duas diferentes ferramentas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Avaliar a influência de diferentes tipos de ferramentas, uma de nitreto cúbico de boro (CBN) e outra de metal duro com revestimento de $\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$;
- Analisar as diversas variáveis do processo de usinagem, como potência de usinagem, rugosidade, vibração, emissão acústica, desgaste das ferramentas e os tipos e as formas de cavacos gerados para as diferentes ferramentas utilizadas e avaliadas;
- Avaliar os impactos da variação de parâmetros de usinagem, como da velocidade de corte e avanço durante o torneamento do aço AISI 52100 para as distintas ferramentas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AÇOS

Os aços são definidos como ligas ferro-carbono que podem conter concentrações variáveis de outros elementos de liga (CALLISTER, 2008).

A classificação dessas diferentes ligas de aço se dá de acordo com a composição química, microestrutura apresentada, propriedades mecânicas ou processos de fabricação (MODENESI, 2011).

As propriedades mecânicas são sensíveis ao teor de carbono com isso, os aços mais comuns são classificados quanto a concentração desse elemento – 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 contêm uma concentração inferior a 0,25%p C e não apresentam respostas satisfatórias a tratamentos térmicos que procuram formar a estrutura da martensita. Como consequência de uma microestrutura formada predominantemente por ferrita e perlita são ligas de menor resistência mecânica, porém com grandes ductilidades e tenacidades. São representantes dessa classificação os aços AISI/SAE 1010 e 1020.
- Aços com médio teor de Carbono: De acordo com Callister (2008), estes possuem concentrações de carbono no intervalo entre 0,25 e 0,60% e suas propriedades mecânicas podem ser melhoradas mediante tratamentos térmicos, principalmente em condições revenida. Devido a isso, apresentam uma maior resistência, porém em detrimento de ductilidade e tenacidade.
- Aços com alto teor de Carbono: De acordo com Callister (2008), estes possuem teores de entre 0,60 e 1,4%p C, consequentemente, são mais duros e resistentes e, assim, menos dúcteis. São utilizados predominantemente em condição endurecida e revenida. Quando acrescidos de cromo, molibdênio, tungstênio e vanádio formam bons aços para ferramentas, mostrando resistência ao desgaste e à abrasão.

De maneira geral, quanto maior a porcentagem de elementos adicionados, mais agregam suas propriedades particulares, afetando sua dureza, força e resistência ao desgaste, em detrimentos de outras propriedades como ductilidade, soldabilidade e tornam-se mais frágeis. (KALPAKJIAN; SCHIMID, 2009).

3.1.1 Aço AISI 52100

O aço AISI 52100 é descrito como hipereutetóide, visto que apresenta um elevado teor de carbono. Para esses aços tem-se uma microestrutura inicial formada por perlita com cementita proeutetóide nos contornos prévios de austenita (CALLISTER, 2008). A composição do mesmo é mostrada no quadro 1, com a porcentagem dos elementos em peso.

Quadro 1 – Composição Química nominal do aço AISI 52100.

	C	Cr	Mn	Si	Cu	Ni	Mo	P	S
Mínimo	0,98	1,39	0,38	0,16	-	-	-	0,019	0,017
Máximo	1,03	1,43	0,41	0,32	0,12	0,07	0,02	0,12	0,006

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

O aço SAE 52100 apresenta características como excelentes propriedades de fadiga, alta temperabilidade e dureza, baixo nível de inclusões de sólidos e gases e também uma alta resistência à compressão e tração. Esses atributos em soma com o baixo custo relativo fazem com que esse aço seja amplamente utilizado para produção de ferramentas, matrizes e rolamentos endurecidos (LUZGINOVA, 2008).

De acordo com Ramos (2010), a microestrutura martensítica aliada com uma fina disposição de carbonetos esferoidizados faz deste aço um excelente material para fabricação de rolamentos, uma vez que para esses componentes são necessárias uma elevada resistência mecânica e dureza.

Segundo Nogueira (1986), o SAE 52100 possui uma baixa tenacidade à fratura e uma temperabilidade limitada, esses fatores podem ser contornados com a adição de mais alguns elementos de liga.

3.2 PROCESSO DE USINAGEM

A usinagem envolve diferentes procedimentos que removem materiais através do cisalhamento, a fim de fabricar produtos úteis. Para isso, são utilizados métodos mecânicos para moldar precisamente uma peça pela remoção de parte do material com ferramentas que possuem arestas cortantes afiadas e precisas (ASM, 1985).

De acordo com Ferraresi (1970), operações de usinagem são aquelas que conferem à um material forma, dimensão e acabamento, e como consequência do processo geram cavaco.

Segundo Trent e Wright (2000), as aplicações de peças usinadas vão desde componentes de relógios até partes de avião, com muitos metros de comprimento. Dado essa versatilidade o processo de usinagem é o mais empregado na fabricação de peças em todo o mundo. Apesar de um processo amplamente utilizado, a usinagem é um procedimento complexo devido às dificuldades em se determinar quais os parâmetros ideais de corte para cada material e geometria.

Para Shaw (2005), o estudo detalhado das mais diversas condições de corte é o que garante um maior entendimento do processo de usinagem, e consequentemente, a redução de sua complexidade.

Os diversos processos de fabricação, dentre eles o de usinagem, estão mostrados na figura 1.

Figura 1 - Categorização dos processos de fabricação



Fonte: Machado et al. (2011).

Hoje em dia, com um elevado nível de precisão dos equipamentos, o torneamento se tornou uma ótima opção quando comparada à retifica, oferecendo melhor custo benefício. Além

disso, fornece uma peça final com resistência à fadiga igual ou superior que a retifica (CHAUDHARI; HASHIMOTO, 2016).

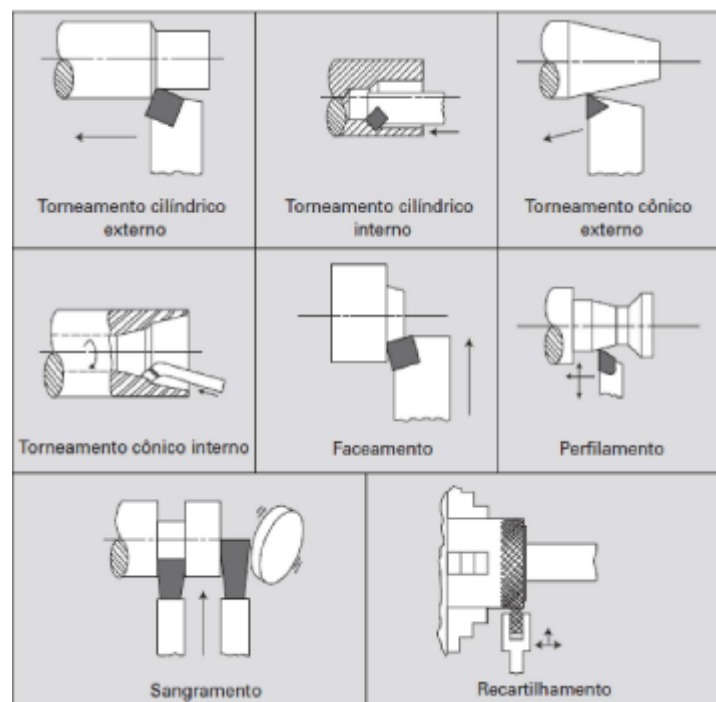
3.2.1 Torneamento

O torneamento é um processo bem antigo e o mais comum empregado nos trabalhos de usinagem. Como principal característica observa-se que o corpo de prova a ser trabalhado é fixado ao mandril de um torno e rotacionado em torno do seu próprio eixo. A ferramenta de corte é firmemente fixada no porta-ferramenta e move-se em uma velocidade constante ao longo do eixo de rotação da peça, removendo o metal. Dessa maneira obtém-se peças cilíndricas ou até mesmo com geometrias complexas, de seção transversal circular (TRENT; WRIGHT, 2000).

No processo de torneamento existem dois fatores cuja atuação define a peça obtida ao final do mesmo, são eles os parâmetros de corte e a geometria da aresta de corte (AMORIM, 2002).

Na figura 2 podemos ver as principais operações que podem ser realizadas no torno.

Figura 2 – Principais operações de torneamento



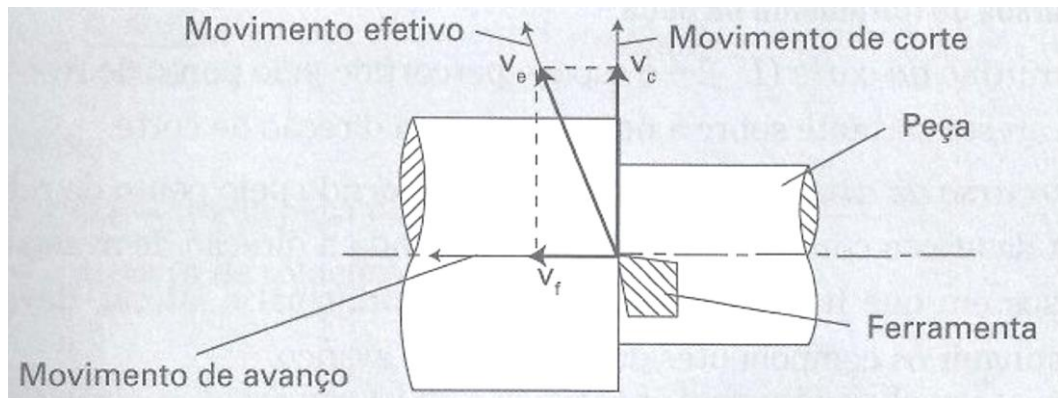
Fonte: Adaptado Machado et al. (2011).

3.2.1.1 Parâmetros de corte para o processo de torneamento

Para Diniz *et al.* (2013), a usinagem só é possível devido a ocorrência de movimentos relativos entre a ferramenta e a peça. Esses movimentos são convencionados ocorrendo com a peça parada e, conseqüentemente, todo o deslocamento sendo efetuado pela ferramenta de corte. Com isso, sempre tem-se como referência a peça. Ainda podemos classificar os movimentos como ativos, aqueles que provocam a remoção efetiva de material e geração de cavaco, ou passivos, aqueles que são importantes para o posicionamento da ferramenta e que não geram remoção de material.

De acordo com Machado *et al.* (20011), tem-se que os movimentos ativos são movimento de corte, movimento de avanço e movimento efetivo, os mesmos estão demonstrados na figura 3. Já os passivos são movimento de aproximação, movimento de ajuste, movimento de correção e movimento de recuo.

Figura 3 - Movimentos ativos no torneamento.



Fonte: Machado *et al.* (2011)

A velocidade de corte é a velocidade tangencial instantânea que resulta da rotação da ferramenta em torno da peça. Essa velocidade está intimamente ligada ao desgaste da ferramenta na operação e também a temperatura da peça que está sendo torneada. Portanto, sua determinação deve ser cautelosa (DINIZ *et al.*, 2013). Para o cálculo desse parâmetro usa-se a equação (1):

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

Onde:

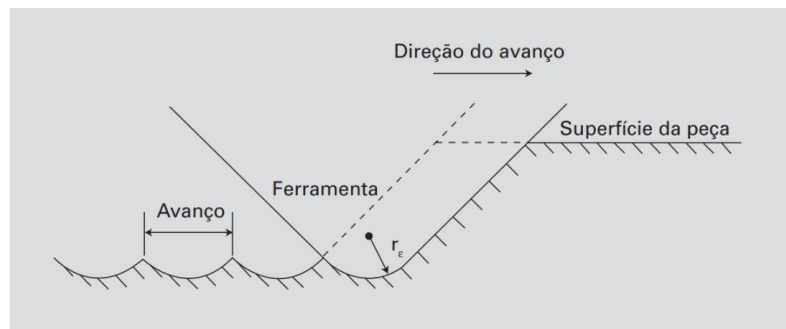
v_c = velocidade de corte (m/min)

d = diâmetro da peça (mm)

η = rotação (rpm)

O avanço é o percurso de deslocamento em cada volta da peça em relação à ferramenta, é expresso em mm/volta. Esse parâmetro influencia diretamente no acabamento superficial da peça, quanto menor o avanço, melhor o acabamento e vice-versa. Relação essa que pode ser observada na figura 4.

Figura 4 – Relação do avanço com o acabamento superficial da peça



Fonte: Machado *et al.* (2011).

De acordo com Diniz *et al.* (2013), para operações de torneamento a velocidade de avanço pode ser calculada como o produto do avanço pela rotação da ferramenta, demonstrada por meio da equação (2):

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

Onde:

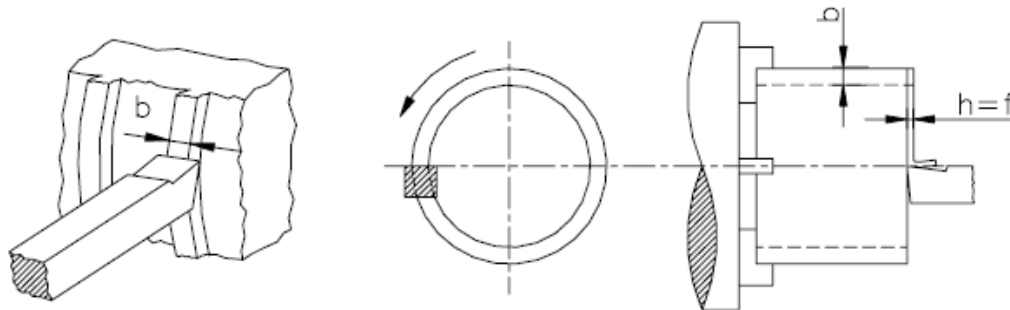
f = avanço (mm/volta)

V_f = velocidade de avanço (mm/min)

3.2.2 Formação de cavaco

Através de simplificações em relação ao processo de usinagem pode-se estudar a formação de cavaco. Isso é obtido no corte ortogonal. Nele a aresta cortante é reta, normal à direção de corte e normal à direção do avanço, dessa maneira, a formação do cavaco que pode ser considerado um fenômeno bidimensional, o qual se dá em um plano chamado de “Plano de Trabalho” (MACHADO et al., 2011). A figura 5 mostra exemplos de usinagens que podem ser aproximadas para o corte ortogonal no torneamento.

Figura 5 – Exemplos de Corte Ortogonal.



Fonte: Machado *et al.* (2011)

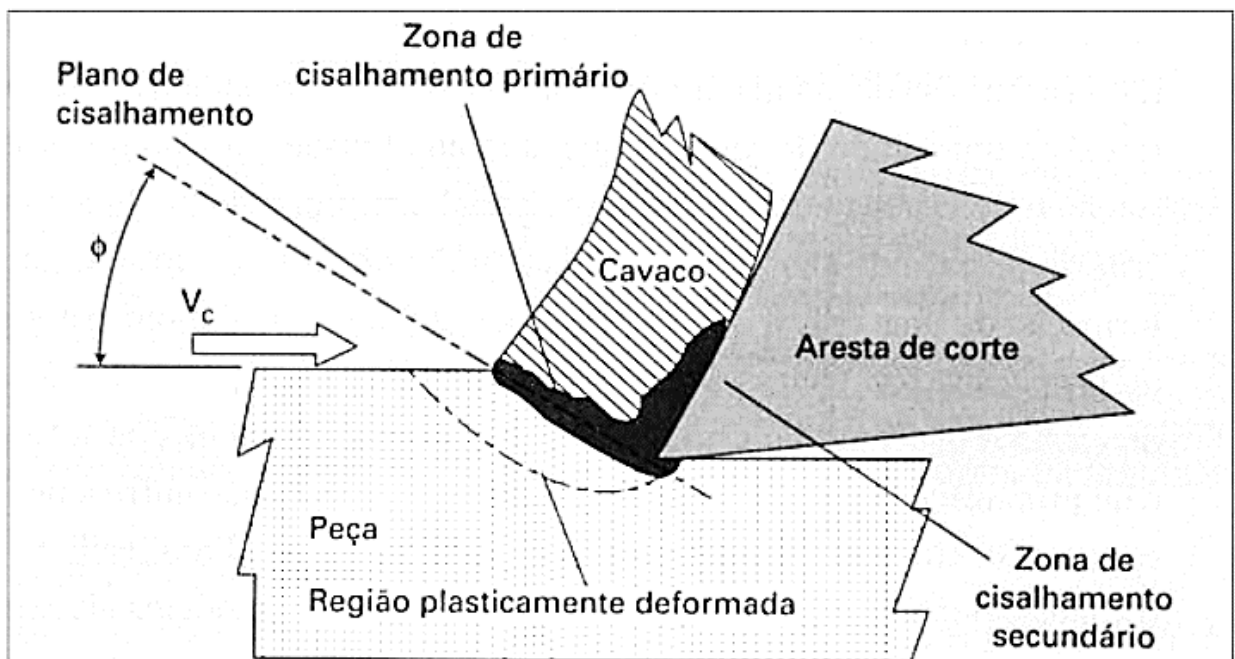
Segundo Machado *et al.* (2011), a formação do cavaco pode ser dividida em quatro eventos, são eles:

- **Recalque inicial:** Uma pequena porção do material, ainda ligada a peça, é forçada contra a superfície de saída da ferramenta, esse evento ocorre uma vez que a cunha cortante da ferramenta penetra a peça.
- **Deformação e ruptura:** A porção de material forçada no evento anterior sofre uma deformação elástica seguida de uma deformação plástica até o limite do material, uma vez ultrapassada a tensão máxima o material sofre uma ruptura. A ruptura é, na maior parte das vezes, causada por forças cisalhantes. Após esse acontecimento é formado “o plano de cisalhamento”, no qual se encontra, a ruptura.
- **Deslizamento das lamelas:** Como se trata de um processo contínuo a penetração da ferramenta, irá gerar uma ruptura parcial ou completa do cavaco, acompanhando o plano de cisalhamento. Nessa etapa as propriedades do material e os parâmetros de usinagem serão de fundamental importância para o tipo de cavaco recém-formado.

- Saída do cavaco: Com o movimento relativo entre ferramenta e peça, começa-se um escorregamento do cavaco formado sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto isso, uma nova porção de cavaco está sendo formado e cisalhado, repetindo todo o processo.

A figura 6 mostra esquematicamente o plano de cisalhamento, região em que ocorre a formação de cavacos, definida pelo ângulo de cisalhamento ϕ formado entre o plano de cisalhamento e a direção da velocidade de corte (V_c).

Figura 6 - Mecanismo de formação de cavacos.



Fonte: Machado *et al.* (2011)

Para Amorim (2002), a formação de cavaco é o principal ponto em comum entre os mais diversos processos de usinagem, em virtude de que todos apresentam como subproduto final o cavaco. A variação do cavaco se dá em tipo, forma e extensão e está sujeita a utilização de diferentes materiais e diferentes operações de usinagem. Dessa maneira, o resultado do cavaco é produto de todas as variáveis presentes na usinagem.

Segundo Diniz *et al.* (2013) estão envolvidos nesse processo de formação aspectos econômicos, aspectos humanos e técnicos, como segurança do operador, qualidade dos materiais da ferramenta e a ser usinado e ainda a utilização adequada da máquina-ferramenta.

3.2.2.1 Tipos e formas de cavacos

Para Machado *et al.* (2011) podemos classificar os cavacos gerados em três grandes categorias.

- Contínuos: Predominantemente encontrado na usinagem de materiais dúcteis. São cavacos longos onde há um equilíbrio entre a tensão normal e a de cisalhamento, dessa maneira a trinca não se propaga de forma rápida, o que permite que o cavaco não seja interrompido. Esse tipo de cavaco é indesejável, pois muitas vezes pode ocasionar acidentes ou ainda avariar a superfície recém usinada, devido a esse fator utiliza-se quebra-cavaco.
- Descontínuos: Geralmente são resultados de usinagem de materiais frágeis. São assim classificados, pois não são capazes de apresentar grandes deformações sem se romper. Para esse tipo de cavaco tem-se a propagação da trinca por toda a extensão do plano cisalhante, causando sua descontinuidade.
- Segmentados: Encontrados na usinagem de materiais de baixa condutividade térmica e com “cisalhamento catastrófico”. Esse tipo de cavaco apresenta grandes deformações em estreitos segmentos com pouca deformação no seus interiores.

O cavaco resultante do processo de usinagem pode ser, ao mesmo tempo, indicativo e causa de problemas no processo. Ele pode causar problemas como danos superficiais ou ocupação excessiva de volume, e sua forma, tamanho e tipo podem ser indicativos de que algo na usinagem não está correto, como por exemplo, a qualidade do material usinado e às condições da ferramenta de corte (AMORIM, 2002).

Quanto a forma dos cavacos, Diniz *et al.* (2013), as classifica em:

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

Cada forma é preferível em um determinado processo e o em fita apresenta alguns inconvenientes mais sérios. Este cavaco pode enrolar-se no torno, danificar o conjunto máquina-ferramenta e prejudicar o acabamento superficial. Além disso, é mais difícil de manusear e ocupa um espaço maior que o cavaco curto.

A classificação detalhada NBR ISO 3685 (2017) dessas formas dos cavacos está representada na figura 7.

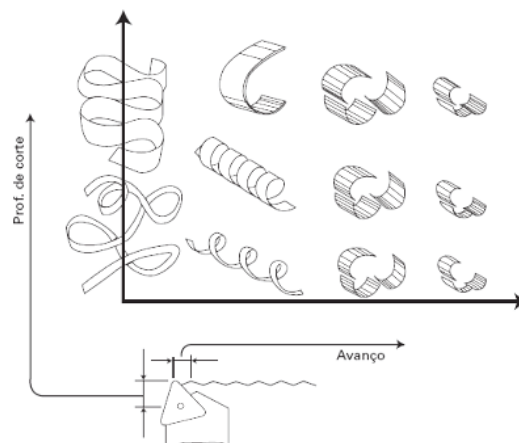
Figura 7 - Classificação do formato de cavaco

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

Fonte: NBR ISO 3685 (2017).

Diversos parâmetros de corte influenciam no formato do cavaco, dentre todos os que mais se destacam nesse quesito são o avanço e profundidade de corte. Na figura 8 está demonstrado como esses dois parâmetros afetam as formas do cavaco. De maneira geral, com 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 um aumento do avanço move para a direita (AMORIM, 2002).

Figura 8 - Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos



Fonte: Machado *et al.* (2011).

3.2.3 Fluidos de Corte

Para Machado e Silva (2004), o uso de fluidos de corte na usinagem é uma opção a ser considerada visando reduzir custos e aumentar a produtividade do processo. Pode ser muito benéfico escolher um fluido com propriedades e composição química para um processo estipulado.

De acordo com Machado *et al.* (2011) as duas principais funções dos fluidos de corte são: a refrigeração a altas velocidade de corte e a lubrificação a baixas velocidades de corte e. Ainda temos como outras funções a remoção dos cavacos da zona de corte, fundamental para processos como o de furação profunda, e proteção da máquina-ferramenta e da peça contra a oxidação.

A melhoria advinda da uso desses fluidos pode ser de caráter funcional ou de caráter econômico. O primeiro é aquele que facilita o processo de usinagem, enquanto o segundo é aquele que induz uma redução de custos no processo de usinagem (FERRARESI, 1970).

3.2.3.1 Usinagem a seco

O maior problema do uso de fluidos de corte é o dano ambiental causado. Visando a eliminação desse dano, processos e componentes de usinagem à seco vem sendo amplamente discutidos e estudados. Essa busca só é possível graças as diversas inovações tecnológicas ocorridas no processo de usinagem (GOINDI; SARKAR, 2017).

Segundo Sreejith; Ngoi (2000), podem-se citar como principais vantagens do não uso de fluido de cortes os benefícios ambientais e para a saúde do operador e a facilidade da reciclagem dos cavacos, visto que, estes são livres de qualquer resíduos.

A usinagem à seco tem como grande desafio um processo que gera elevadas temperaturas. Como consequência, tem-se elevadas cargas térmicas, e altos níveis de oxidação, difusão e abrasão da ferramenta utilizada. Todos esses fatores contribuem para uma drástica redução da vida da ferramenta. Outro fator que deve ser levado em consideração nesse processo é a dilatação térmica tanto da peça quanto da ferramenta devido as altas temperaturas, o que por sua vez gera problemas de acabamento superficial e maiores tolerâncias (KLOCKE; EISENBLATTER, 1997).

Segundo Diniz *et al.* (2013), um corte a seco que minimize a redução da vida útil da ferramenta e/ou a perda de qualidade superficial da peça, deve ter a escolha de materiais para ferramentas que possuam alta dureza a elevadas temperaturas, ótima estabilidade química e um

coeficiente de atrito baixo. Possuem essas características ferramentas de metal duro com cobertura de TiCN (carbonitreto de titânio), AlTiN (nitreto de alumínio-titânio) e diamante. Também deve-se levar em consideração as condições de corte, sendo indicado aumentar o avanço e diminuir a velocidade de corte, visando a manutenção do volume de cavaco e de calor gerados por unidade de tempo (DINIZ *et al.*, 2013).

3.2.4 Materiais para ferramentas

O processo de usinagem, que tem como princípio base a remoção de material, utiliza como ferramenta um material mais duro que o da peça. A constante pesquisa por novos materiais e ligas com melhores resistências e elevadas durezas contribui para o avanço da seleção de ferramentas para a usinagem (MACHADO *et al.*, 2004).

De acordo com Diniz *et al.* (2013), a determinação do material para a ferramenta deve ser fundamentada em vários fatores, entre os quais se destacam:

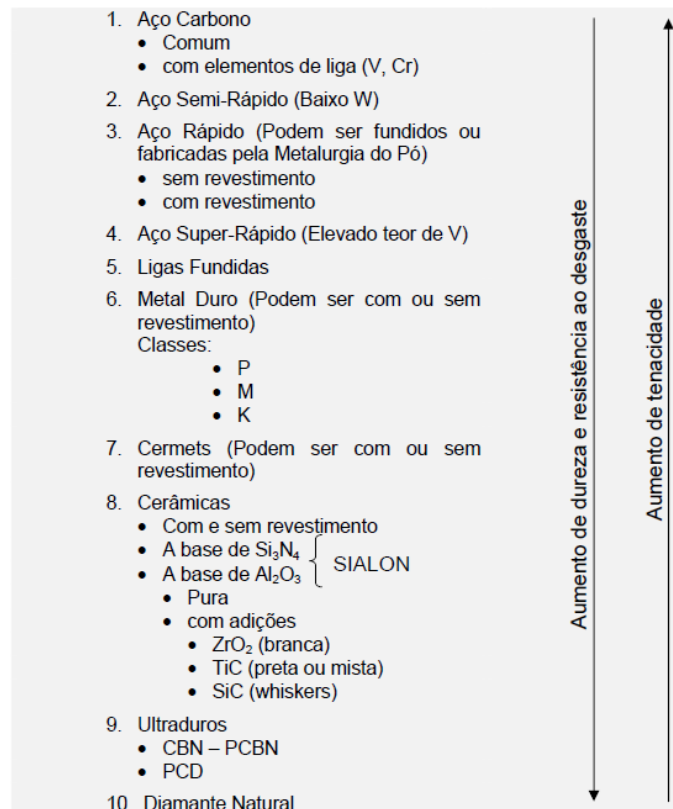
- O material que será usinado: a dureza e o tipo de cavaco que é formado;
- Processo de usinagem;
- Condição de máquina operatriz;
- Forma e dimensões da ferramenta;
- Custo do material da ferramenta: relação custo/benefício;
- Condições de usinagem e parâmetros de corte;

De maneira geral os materiais para ferramentas são agrupados com base em suas características da seguinte maneira: aços carbono (sem elementos de liga ou com baixos teores de liga; aços rápidos; ligas fundidas; metal duro e materiais cerâmicos. Os aços rápidos e o metal duro são amplamente utilizados, e devido a isso há um grande número de estudos e pesquisas com relação a esses materiais (FERRARESI, 1970).

O grande desafio para os fabricantes é a oposição entre as propriedades de dureza e tenacidade (na maior parte de casos alta dureza reflete em uma baixa tenacidade e vice-versa). A conciliação dessas propriedades é objeto de estudo de diversas pesquisas e a produção de ferramentas com diversas composições químicas, controle dos processos de fabricação, tamanho de grãos e tratamento térmico se mostram eficientes na produção de ferramentas com

qualidades excepcionais. A figura 9 mostra a lista dos materiais para ferramentas e a oposição entre as propriedades mencionadas (MACHADO *et al.*, 2004).

Figura 9 – Materiais disponíveis para ferramentas de corte



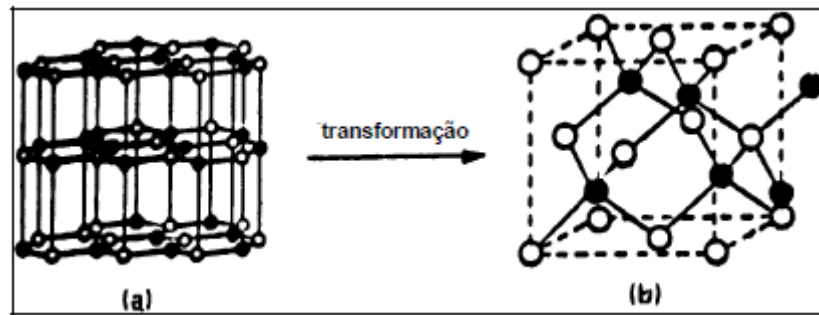
Fonte: Machado *et al.* (2004).

3.2.4.1 Ferramenta de Nitreto Cúbico de Boro

Material sintético que a partir dos últimos anos da década de 70 entrou no mercado de ferramentas como uma forma de substituir o diamante. Geralmente brasadas no metal duro com uma camada de 0,5 a 1,0 mm. Assim como o diamante sintético, o nitreto cúbico de boro é obtido sujeitando o nitreto hexagonal de boro a temperaturas e pressões extremamente altas (aproximadamente 1500°C e 6 GPa), para acelerar as reações e tornar o processo mais econômico são utilizados solventes, nesse caso um nitreto metálico (MACHADO *et al.*, 2004).

A figura 10 mostra a transformação da estrutura cristalina para obtenção do material.

Figura 10 – Estrutura cristalina do HBN e do CBN



Fonte: Heath (1986).

O CBN é quimicamente mais estável se comparado com o diamante, sendo assim, é possível usar ligas ferrosas sem a ocorrência de desgaste por difusão. Possui tenacidade similar aos materiais cerâmicos e tem dureza superada apenas pelo diamante (DINIZ *et al.*, 2013).

De acordo com Diniz *et al.* (2013) é importante se atentar aos seguintes pontos quando se usa com ferramentas de CBN:

- O sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação-peça deve ser o mais rígido possível;
- A geometria da ferramenta deve ser negativa, garantindo a resistência aos choques e o maior ângulo lateral de posição minimizando as trincas na aresta;
- A aresta de corte da ferramenta deve ser chanfrada, direcionando os esforços de corte para o centro da mesma.

3.2.4.2 Ferramenta de Metal Duro

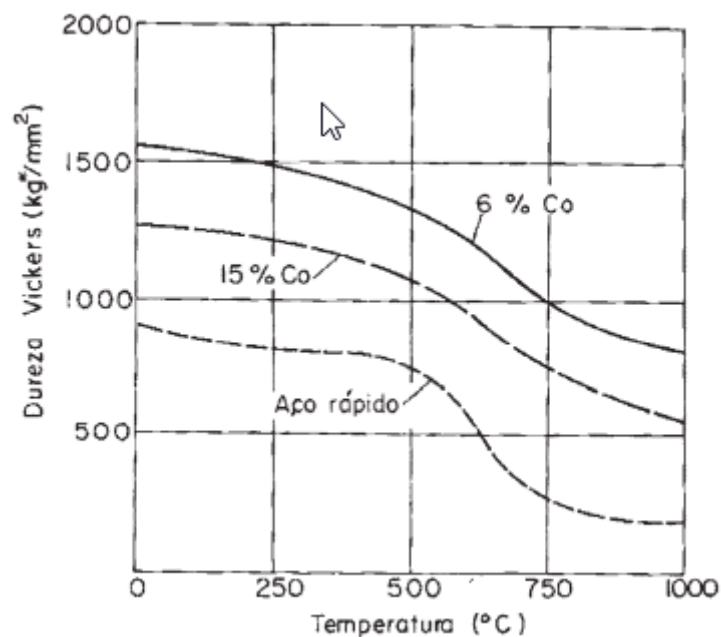
Com o surgimento dos metais duros, as velocidades de corte usadas na usinagem foram aumentadas em praticamente dez vezes (de 35 m/min usada em aços-rápidos para 250-300 m/min com esse novo material). A mistura do pó de WC com pó de cobalto, trouxe ao mercado, na década de 30, um dos materiais de ferramenta de corte mais utilizados até os dias de hoje (MACHADO *et al.*, 2004).

Produto da metalurgia do pó, o metal duro é feito de partículas duras de carbonetos de tungstênio combinado ou não com carbonetos de titânio, tântalo e nióbio. Tendo como elemento aglomerante metais do grupo do ferro, geralmente o cobalto. Como resultado dessa combinação

tem-se um material com alta dureza e resistência à compressão e com uma boa tenacidade (DINIZ *et al.*, 2013).

A variação da dureza a quente, propriedade de muito valor nos processos de usinagem, em função da temperatura é apresentada na figura 11. Onde são apresentadas duas curvas de metal duro, com variação no teor de cobalto, e uma curva de aço rápido, para efeito comparativo (FERRARESI, 1970).

Figura 11 - Influência do teor de cobalto e da temperatura na dureza do metal duro.



Fonte: Ferraresi (1970).

3.2.4.3 Metal duro com recobrimento

O uso de recobrimento de ferramentas de metal duro tem seu destaque, uma vez que, pode proporcionar um ganho de desempenho quando comparado à ferramentas sem revestimento. O sucesso desse material é tão grande que praticamente 90% do metal duro utilizado nos processos de usinagem apresenta revestimento. Esses revestimentos são aplicados em qualquer uma das classes de metal duro e admitem tanto o processo de deposição física de vapor (PVD) quanto o de deposição química de vapor (CVD) (MACHADO *et al.*, 2004).

A principal função do revestimento é conciliar propriedades fundamentais no mesmo material, ou seja, criar uma camada superior mais resistente ao desgaste, mantendo a tenacidade do núcleo da ferramenta. Como consequência dessa nova camada tem-se um acréscimo

considerável da vida útil e uma redução dos esforços de corte. Os materiais mais utilizados para o revestimento são o carboneto de titânio, óxido de alumínio e nitreto de titânio (DINIZ *et al.*, 2013).

3.2.4.4 Processo CVD

O processo de *Chemical Vapor Deposition*, conhecido como CVD, é utilizado para formar uma película fina através da aplicação de um material sólido a partir de uma fase gasosa por meio de uma reação química que acontece em um substrato aquecido. Tal processo pode ser aplicado a superfícies de geometrias complexas. Um fator limitante do CVD é a aplicabilidade apenas em casos onde a temperatura do substrato requerido é aceitável. De modo geral, são utilizados comercialmente três materiais de revestimento, sendo eles: o carboneto de titânio (TiC), o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o nitreto de titânio (TiN) (SHAW, 2005).

De maneira geral, a espessura total das camadas de revestimento varia entre $4\mu\text{m}$ e $12\mu\text{m}$. Quando muito espessas podem acabar por fragilizar a aresta. A utilização de várias camadas finas, sobrepostas entre si, gera uma resistência da aresta superior quando comparada a utilização de camadas singulares mais espessas, totalizando a mesma espessura (WERTHEIM *et al.*, 1982).

O quadro 2 mostra as propriedades dos materiais que são utilizados hoje em dia para o revestimento. Onde *1 representa o impacto térmico (relação entre condutividade térmica X resistência à tração e coeficiente de expansão X módulo de Young), *2 representa a temperatura máxima apresentada para a resistência à oxidação, e *3 a temperatura ambiente.

Quadro 2 – Propriedades das 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_2O_3	2100	-4,0	29	-	Estável	0

Fonte: Mitsubishi (2006).

Para Shaw (2005), uma vantagem do processo CVD é que este permite uma melhor ligação entre as camadas de revestimento e o substrato quando comparado com o processo PVD, uma vez que o primeiro ocorre em temperaturas acima de 1000 °C. Sendo assim, o CVD é o principal método empregado no revestimento de metal duro (WC-Co) e nos substratos cerâmicos.

Algumas das principais características das camadas de revestimentos utilizadas, segundo Diniz *et al.* (2013), são:

- **Nitreto de titânio (TiN):** utilizado, normalmente, como a camada externa do revestimento, pois proporciona baixos coeficientes de atrito entre as superfícies da ferramenta e do cavaco. Além disso, possui menor tendência à difusão em aços.
- **Carbeto de titânio (TiC):** utilizado, normalmente, como primeira camada do revestimento, pois proporciona uma ótima coesão com o substrato. Além disso, é um dos materiais mais duros para revestimentos o que garante uma excelente resistência ao desgaste por abrasão.
- **Óxido de alumínio (Al₂O₃):** apresenta diversas vantagens, entre as quais as principais são: a inércia química proporcionada, sua dureza e resistência ao desgaste, e a redução da condutividade térmica com o aumento da temperatura, o que gera uma excelente barreira térmica na ferramenta.
- **Carbonitreto de titânio (TiCN):** apresenta características de resistência ao desgaste, dureza e capacidade de coesão com o substrato similares aos do TiC, mostrando, porém, um coeficiente de atrito menor.

3.3 DESGASTE E AVARIA DE FERRAMENTA

Independentemente da dureza e da resistência tanto da ferramenta de corte quanto da peça a ser usinada, após um determinado período a ferramenta necessitará ser substituída devido ao desgaste. Entender os processos de destruição das ferramentas é fundamental para aplicação de ações corretivas e efetivas para diminuir esse fenômeno, aumentando a sua vida útil. Além disso, com o entendimento do desgaste das ferramentas é possível melhorar os materiais, tornando a usinagem um processo mais produtivo e eficiente (MACHADO e SILVA, 2004).

Segundo Ferraresi (1970), são consideradas avarias da ferramenta as quebras, trincas, sulcos e deformações plásticas que ocorrem na aresta de corte.

As definições dos fenômenos de avaria, desgaste e deformação plástica são apresentadas a seguir:

- **Avaria:** de modo geral, acontece de forma repentina e não esperada, pode ser causado por quebras, lascamentos ou trincas da aresta de corte. As avarias podem estar relacionadas com a tenacidade do material da ferramenta (SANTOS, 2007).
- **Desgaste:** ocasionado, na maior parte dos casos, pelo atrito entre as superfícies presentes nos processos de usinagem. Está associado à parâmetros de corte como temperatura e velocidade de corte. Diferentemente da avaria, no processo de desgaste há uma gradual perda de material (MACHADO *et al.*, 2011).
- **Deformação plástica:** Deslocamento do material que gera uma mudança na geometria da aresta de corte. Sob altas tensões atuantes na superfície da ferramenta durante a usinagem causando um cisalhamento. Fenômeno mais comum de ocorrer em ferramentas de maior tenacidade e menos resistência ao cisalhamento, como o aço rápido, as ligas fundidas e o metal duro (MACHADO *et al.*, 2011).

De maneira geral, as avarias são mais comuns em processos de corte interrompido, devido a presença de choques térmicos e mecânicos. Sendo mais raro de ocorrer nos processos de corte contínuo, exceto em casos onde as condições de corte que excedem as recomendadas para a ferramenta, ou seja utilizado uma geometria inapropriada. Os outros dois fenômenos, o desgaste e a deformação, são observados em ambos os processos de corte, contínuo ou interrompido, e são observados nas superfícies de folga e na superfície de saída das ferramentas (MACHADO *et al.*, 2011).

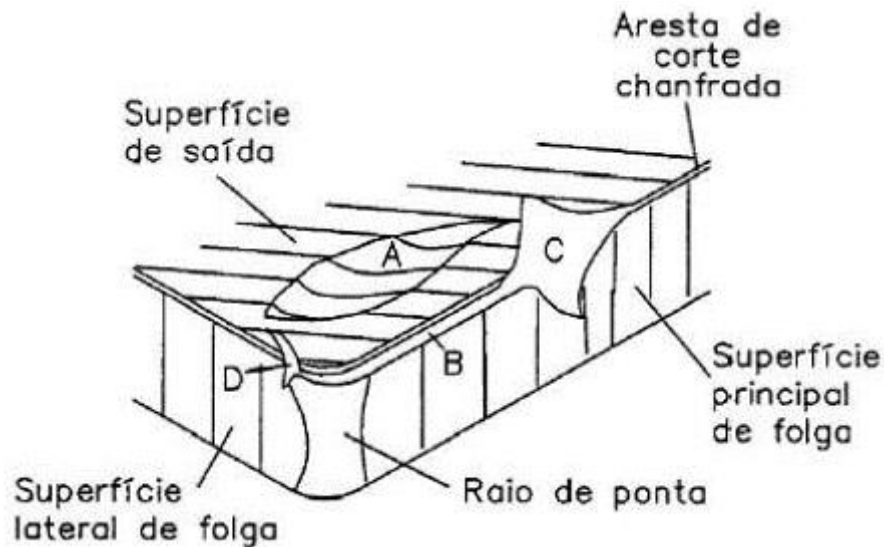
A seguir serão trabalhados os desgastes das ferramentas no processo de torneamento.

3.3.1 Desgastes nas ferramentas de corte

Durante o processo de usinagem verifica-se uma perda gradual e progressiva de material nas superfícies de folga e de saída da ferramenta. Esse fenômeno pode ser induzido por diversos fatores, como por exemplo, elevadas tensões na ponta da ferramenta e altas temperaturas na face de corte (KALPAKJIAN; SCHIMID, 2009).

De acordo com Santos e Sales (2007), é possível observar pelo menos três formas principais de desgaste, sendo estas desgaste de cratera (região A), desgaste de flanco (região B) e desgaste de entalhe (regiões C e D), apresentadas na figura 12.

Figura 12 – Principais formas de desgaste e suas respectivas áreas nas ferramentas de corte



Fonte: Machado et. al. (2011).

A Norma NBR ISO 3685 (2017) utiliza certos parâmetros para quantificar os desgastes e prevenir que esse fenômeno coloque a usinagem em risco. Entre os principais parâmetros estão:

- KT: profundidade de cratera
- VB_B : desgaste de flanco médio
- $VB_{máx}$: desgaste de flanco máximo
- VB_N : desgaste de entalhe

3.3.1.1 Tipo de desgaste da ferramenta

Desgaste de flanco (ou frontal): é o tipo de desgaste mais encontrado nos processos de usinagem. Ocorre em qualquer processo e acontece na superfície de folga da ferramenta sendo causado pelo atrito da ferramenta com a peça. Como consequência desse desgaste tem-se um prejuízo no acabamento superficial. O desgaste de flanco é instigado pelo aumento da velocidade de corte (DINIZ *et al.*, 2013). O fenômeno é mostrado na figura 13.

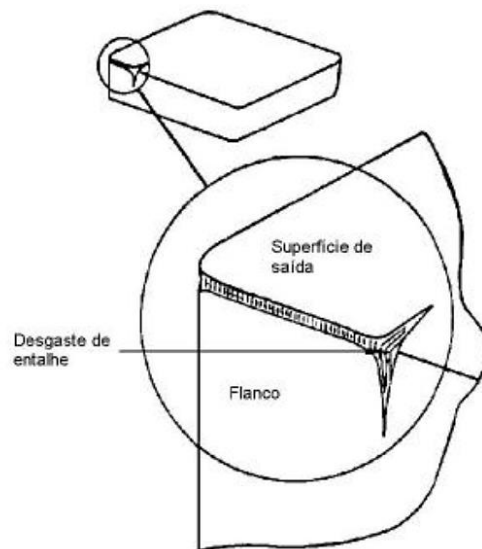
Figura 13 – Desgaste de flanco em uma ferramenta de corte



Fonte: Sumitomo (2015).

Desgaste de entalhe: pode ocorrer nos dois extremos de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça. Como tende a mudar a geometria da ponta da ferramenta tem um grande impacto no acabamento superficial resultante. O desgaste de entalhe é instigado pelo aumento da velocidade de corte e da temperatura (DINIZ *et al.*, 2013). Também pode atuar como uma região concentradora de tensões, levando à quebra prematura da ferramenta (AMORIM, 2002). O fenômeno é mostrado na figura 14.

Figura 14 - Desgaste de entalhe em uma ferramenta de corte

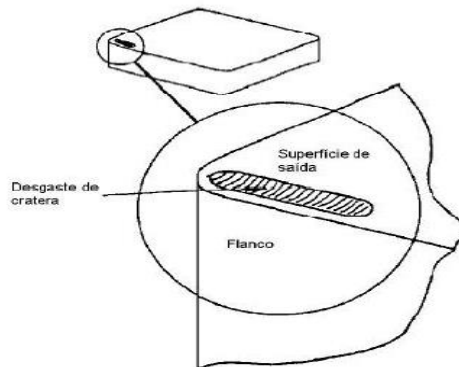


Fonte: Amorim (2002).

Desgaste de cratera: ocorre na zona de deslizamento do cavaco, ou seja, a superfície de saída da ferramenta. É resultado da combinação da abrasão e difusão, que ocorrem a altas velocidades de corte e altas temperaturas geradas durante a usinagem. A forma assumida pelo

desgaste, de cratera alongada com as extremidades arredondadas e paralela à aresta de corte, é resultado das tensões atuantes na região. O desgaste de cratera é mostrado na figura 15.

Figura 15 – Desgaste de cratera em uma ferramenta de corte



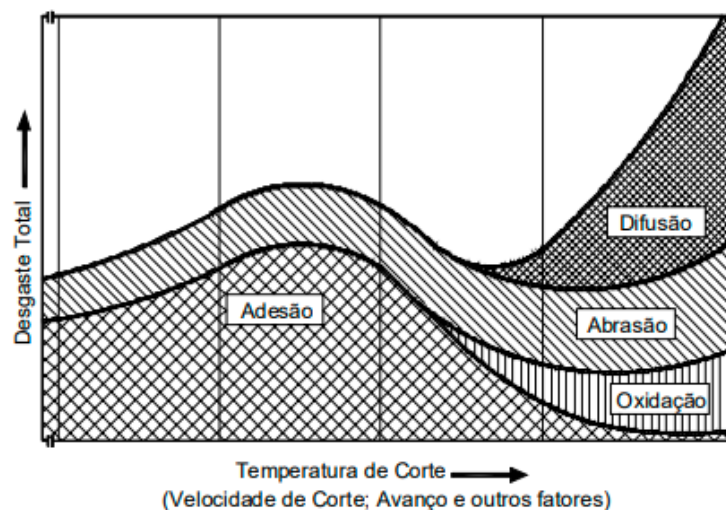
Fonte: Amorim (2002).

3.3.1.2 Mecanismos de desgaste da ferramenta

Além dos tipos de desgaste, é fundamental analisar e entender quais são os mecanismos causadores desses desgastes.

Segundo Ferraresi (1970), o desgaste de uma ferramenta é o resultado da ação de vários fenômenos distintos, denominados *componentes do desgaste*. Dependendo da natureza do material usinado e das condições de usinagem, predominará um ou outro dos componentes dos desgastes sobre as demais, conforme mostrado na figura 16.

Figura 16 – Distribuição dos mecanismos de desgaste

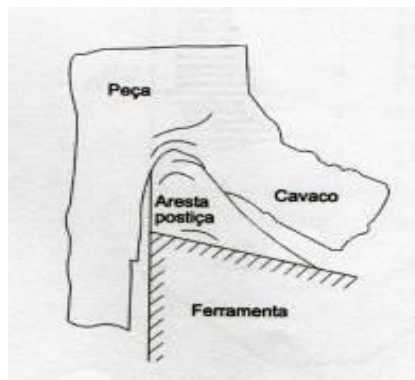


Fonte: Adaptado de Machado e Silva (2004).

Para Diniz *et al.* (2013), são vários os fenômenos que causam desgastes da ferramenta. Se destacando entre eles: aresta postiça de corte, abrasão mecânica, aderência, difusão e oxidação.

Aresta postiça de corte: formação de uma camada de cavaco que permanece aderente na superfície de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta e, acaba por modificar seu comportamento com relação à acabamento superficial, força de corte e desgaste da ferramenta. A aresta postiça tende a crescer gradualmente até se romper abruptamente arrancando partículas da superfície de folga da ferramenta. Esse mecanismo gera um grande desgaste frontal, enquanto o desgaste de cratera é mínimo, uma vez que o cavaco atrita com a aresta postiça ao invés da superfície de saída (DINIZ *et al.*, 2013). O mecanismo está exemplificado na figura 17.

Figura 17 – Representação da aresta postiça de corte



Fonte: Diniz *et al.* (2013).

Abrasão mecânica: também denominado de atrito mecânico. É uma das principais causas de desgaste da ferramenta. Pode provocar tanto desgaste frontal como de cratera, porém o primeiro é mais elevado, uma vez que a superfície de folga atrita com a peça, enquanto que a superfície de saída atrita com o cavaco. Esse desgaste é estimulado pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte, que reduz a dureza da ferramenta. Dessa forma, ferramentas com excelente dureza a quente apresentam um menor desgaste abrasivo (DINIZ *et al.*, 2013).

Aderência: formação de um extrato metálico que provoca aderência quando há um contato entre duas superfícies sob determinada carga, baixa temperatura e baixa velocidade de corte. Como consequência, tem-se uma região de resistência elevada, que na tentativa de separação se rompe em um dos metais ao invés da superfície de contato. Assim, partículas da

superfície de um metal migram para a superfície do outro material. Esse mecanismo está presente na formação da aresta postiça de corte. A utilização do fluido de corte e o recobrimento da ferramenta por um material com baixo coeficiente de atrito podem reduzir esse mecanismo de desgaste (DINIZ *et al.*, 2013).

Difusão: é a transferência de átomos de um material para o outro, causando assim modificações nas propriedades da superfície da ferramenta. É fortemente influenciado pela temperatura e solubilidade dos elementos envolvidos na zona de fluxo (zona de cisalhamento secundário) e costuma ser mais elevado em altas velocidades de corte e grandes avanços. Esse mecanismo está presente na zona de aderência, uma vez que precisa de um intervalo de tempo para ocorrer. A utilização de materiais com grande inércia química ou de revestimentos que dificultem a difusão reduzem esse mecanismo (AMORIM, 2002).

Oxidação: é gerada por altas temperaturas e presença de ar e água (contida nos fluidos de corte). O desgaste se forma, predominantemente, nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido a grande quantidade de ar nesta região, sendo responsável pelo desgaste de entalhe (DINIZ *et al.*, 2013).

3.4 ACABAMENTO SUPERFICIAL

O acabamento superficial, expressado pela rugosidade, nada mais é que um conjunto de irregularidades, com espaçamento determinado ou não, que tendem a formar uma textura padrão em uma superfície. A rugosidade está presente em todas as superfícies dos materiais e é resultado do método de fabricação da mesma. Essa característica das superfícies está relacionada com outros fatores como: Precisão e tolerância; resistência à corrosão e à fadiga; Escoamento de fluidos e lubrificação; transmissão de calor (AMORIM, 2002).

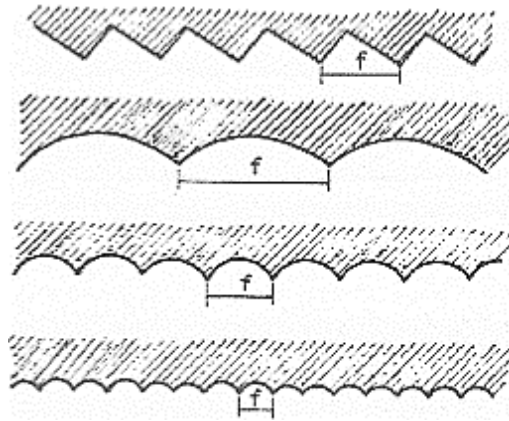
Para Gupta e Kohli (2014), o acabamento superficial é considerado um indicador da qualidade do produto, sendo uma característica de muito apreço nos processos de usinagem.

De acordo com Machado *et al.* (2011), a rugosidade de uma superfície é função de diversos parâmetros, entre os quais podem ser citados a máquina ferramenta, as propriedades mecânicas do material da peça, a geometria e o material da ferramenta e a operação de usinagem utilizada.

De maneira geral, tem-se uma melhora do acabamento superficial com o aumento da velocidade de corte. A alteração do avanço tem um grande impacto na qualidade do acabamento superficial, sendo que para pequenos avanços se observa melhores acabamentos (STEMMER,

2001). A figura 18 exibe a variação da rugosidade do material em função da forma da ferramenta de corte e do avanço.

Figura 18 - Variação da superfície usinada em função do avanço e da forma da ferramenta



Fonte: Stemmer (2001).

3.4.1 Parâmetros para a quantificação da rugosidade

Segundo Santos e Sales (2007), a rugosidade está sujeita a influência de um elevado número de variáveis e pode ser avaliada por diferentes parâmetros, que podem ser classificados como:

- Parâmetros de amplitude: definidos pelas alturas dos picos e/ou profundidade dos vales, não considerando o espaçamento entre as irregularidades na superfície;
- Parâmetros de espaço: definidos pela distância entre as irregularidades em toda a superfície;
- Parâmetros híbridos: definidos pela combinação dos parâmetros de amplitude e espaçamento.

A Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002) define os principais parâmetros, entre eles a rugosidade média (R_a) e rugosidade total (R_t), mostrados no quadro 3.

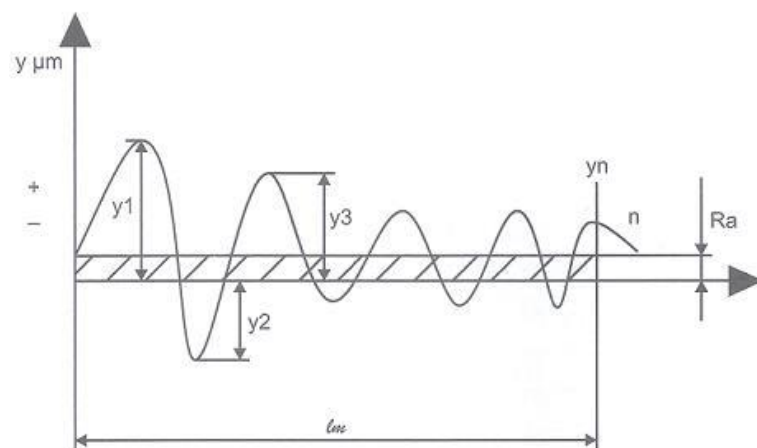
Quadro 3 – Parâmetros R_a e R_t de rugosidade

R_a	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos 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

Fonte: Adaptado de Machado *et al.* (2011).

3.4.1.1 Rugosidade média (R_a)

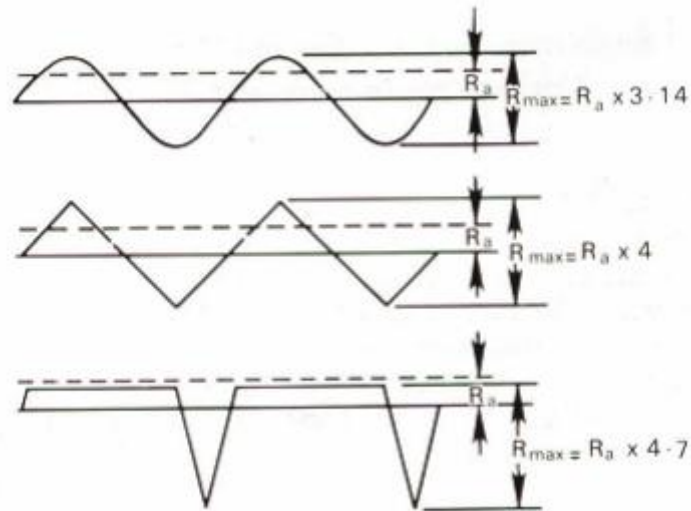
A rugosidade média, segundo Santos e Sales (2007) é definida como a média das distâncias entre os pontos da superfície e a linha de centro, por toda a extensão do comprimento selecionado para análise. A figura 19 ilustra essa definição, onde y é a altura total de cada pico ou vale e l_m é o comprimento de análise.

Figura 19 – Rugosidade média (R_a)

Fonte: Silva Neto (2019).

Parâmetro muito utilizado na indústria uma vez que para sua medição são necessários instrumentos baratos e de muita simplicidade. Uma vez, que indica um valor médio, é um parâmetro estável e que não é influenciado por efeitos ocasionais. Entretanto, seu valor isolado não é suficiente para definir algumas características da superfície (MACHADO e SILVA, 2004). A figura 20 mostra superfícies diferentes que podem possuir R_a bem próximos.

Figura 20 – Superfícies diferentes com o mesmo valor de R_a

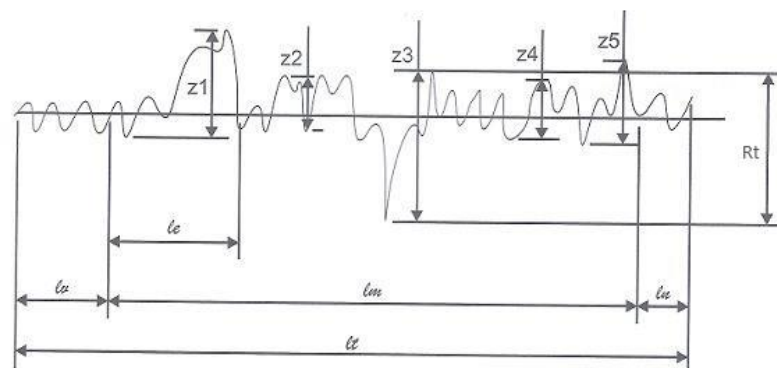


Fonte: Adaptado de Dagnall (1986).

3.4.1.2 Rugosidade total (R_t)

A rugosidade total é a distância vertical máxima da rugosidade, ou seja, a soma da maior altura de pico com a maior profundidade de vale em um comprimento analisado. Esse parâmetro, diferentemente da rugosidade média, pode ser influenciado pela presença de qualquer sujeiro ou irregularidade na superfície da peça (MACHADO e SILVA, 2004). A figura 21 ilustra essa definição, onde para cada intervalo de comprimento tem-se uma rugosidade total diferente.

Figura 21 – Rugosidade total (R_t)



Fonte: Silva Neto (2019).

3.5 POTÊNCIA DE USINAGEM

Segundo Machado *et al.* (2011), a potência de usinagem é fruto dos produtos das componentes da força de usinagem pelas suas respectivas componentes de velocidade, ou seja, a partir do conhecimento da força de usinagem é possível estimar a potência que será exigida no processo de corte.

Para o cálculo da potência de corte de um processo é utilizado a equação 3. Onde o valor da potência é fornecido em kW, F_c é a força de corte (dada em newton) e V_c a velocidade de corte (dada em metro por minuto).

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

Já para a potência de avanço tem-se a equação 4. Onde o valor da potência é fornecido em kW, F_f é a força de avanço (dada em newton) e V_f é a velocidade de avanço (dada em milímetro por minuto).

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

Para Diniz *et al.* (2013), fazendo uma relação entre essas potências e possível afirmar que a potência de avanço é muito menor que a potência de corte, chegando a ser até 140 vezes menor. Devido a essa relação, a primeira pode ser desprezada para o dimensionamento do motor da máquina.

Para o cálculo da potência fornecida pelo motor (P_m) é utilizado a equação 5. Onde os valores das potências são fornecidos em kW e η é o rendimento da máquina ferramenta, que de maneira geral tem seus valores entre 60 e 80% para máquinas convencionais e maior que 90% em máquinas CNC.

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

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, também pode ser entendida como a energia necessária de fato para que a ferramenta retire uma unidade de volume da peça (MACHADO e SILVA, 2004). A K_s

pode ser calculada pelo uso da equação 6, onde F_c é a força de corte, f é o avanço e a_p a profundidade de corte.

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

3.6 EMISSÃO ACÚSTICA

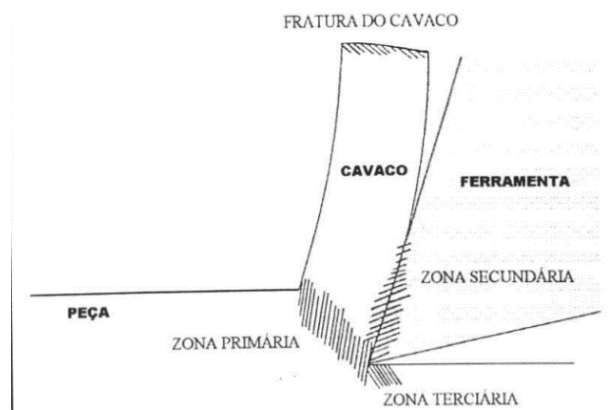
A emissão acústica é definida como a propagação de uma onda vibracional na estrutura cristalina dos materiais, como consequência do constante rearranjo sofrido pela estrutura interna do material. Ou seja, a partir de um estímulo externo, a estrutura do material é reordenada, o que libera uma determinada quantidade de energia, que por sua vez gera ondas de tensão elétrica deslocando a superfície do material. Esse deslocamento pode ser medido usando um sensor piezoelétrico e, convertido em sinal elétrico (WILLIANS, 1977). De acordo com Li (2002), a emissão acústica nada mais é que uma onda de tensão que se propaga pelo interior do material como consequência de uma liberação repentina de energia de deformação.

A dificuldade de desenvolvimento de modelos teóricos em função das diversas fontes geradores e da natureza aleatória dos sinais de pico aliado ao fato de que a emissão acústica viaja através de corpos físicos e que as superfícies existentes entre a geração e o sensor podem intervir no sinal traduz o problema do estudo desse parâmetro (Hanchi e Klamecki, 1991).

Em um processo de usinagem, as principais fontes de emissão acústica, de acordo com (SOUZA, 2004), são descritas a seguir e apresentadas na figura 22.

- *Zona primária*: onde ocorre a deformação plástica principal durante a formação do cavaco com o cisalhamento do material;
- *Zona secundária*: onde ocorre a maior taxa de deformação do cavaco na zona de escorregamento (atrito) da peça com a superfície de saída da ferramenta;
- *Zona terciária*: onde ocorre o atrito entre a peça e a superfície de folga da ferramenta;
- *Região de fratura de cavaco*: na formação de fragmentos descontínuos de material;
- Fenômenos geradores de sinais de pico, como lascamento ou quebras.

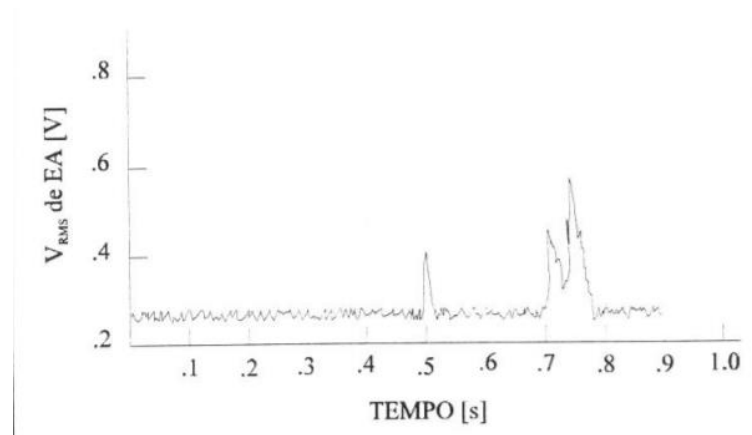
Figura 22 – Principais origens da emissão acústica na usinagem



Fonte: Lan & Dornfeld (1986).

Segundo Bhuiyan *et al.* (2014), durante a usinagem são gerados dois tipos de sinal sendo um que o tipo de sinal contínuo está associado com deformações plásticas da peça ou do cavaco e o desgaste de ferramenta durante o corte, enquanto que o sinal do tipo transiente ou de pico é observado no aumento de falhas e rachaduras internas, além da quebra da ferramenta, impactos ou quebra de cavacos e lascamento. A diferença entre o nível de energia dos tipos de sinais pode ser observada na figura 23.

Figura 23 – Amostra do sinal de emissão acústica



Fonte: Lan & Dornfeld (1986).

3.7 VIBRAÇÃO

Segundo Thomson (1978) qualquer corpo composto por uma determinada massa e elasticidade é capaz de vibrar. O grande interesse das indústrias é evitar ou minimizar essas

vibrações que acabam produzindo um acabamento de baixa qualidade e pode causar danos aos componentes da máquina (LAURI *et al.*, 2014).

Para Costa (1995), que 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. A dificuldade na determinação do intervalo de amplitude está no fato de que inúmeros fatores influenciam na vibração, dentre esses fatores, podem ser mencionados: a formação do cavaco, o estágio de conservação da máquina, a instalação inadequada, a estágio da vida da ferramenta, entre outros.

De acordo com Kalpakjian e Schmid (2009), vibrações e trepidações podem também ser geradas pelos seguintes problemas:

- Acabamento superficial ruim;
- Perda da precisão dimensional da peça;
- Desgates prematuros e falhas na ferramenta de corte;
- Possíveis danos na máquina-ferramenta.

As vibrações durante a usinagem são proporcionais às forças de corte, a determinados parâmetros de corte e a dureza do material usinado. Materiais de maior dureza como os aços martensíticos, aços inoxidáveis, ligas de níquel tendem a gerar maiores vibrações. Além disso, o tipo de cavaco produzido também tem sua influência. Cavacos contínuos são produzidos com força de corte constante, produzindo assim poucas trepidações. Enquanto os cavacos descontínuos são periódicos, resultando em força variável durante o corte, podendo causar maiores vibrações (KALPAKJIAN; SCHIMID, 2009).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto de pesquisa foi desenvolvido no Laboratório de Estudo da Usinagem na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP e nesta seção, serão apresentados os materiais e métodos para o seu desenvolvimento.

4.1 MATERIAL

O material utilizado foi o aço AISI 52100. Ele foi adquirido com a composição química conforme a tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Composição química do aço AISI 52100

C	Mn	Si	P	S	Cr	Fe
1,07	0,43	0,22	0,025	0,035	1,48	96,74

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 CORPO DE PROVA

Foi utilizado como corpo de prova o aço SAE 52100 com dimensões de Ø40x150mm, que foi previamente temperado e revenido, possuindo uma dureza de 832 HV, a figura 24 mostra o material já fixado no torno com o uso de uma contra ponta.

Figura 24 – Corpo de prova fixado ao Centro de Torneamento.



Fonte: Elaborado pelo autor

Já a figura 25 mostra o ensaio realizado com a ferramenta de CBN.

Figura 25 - Ensaio com a ferramenta de CBN



Fonte: Elaborado pelo autor

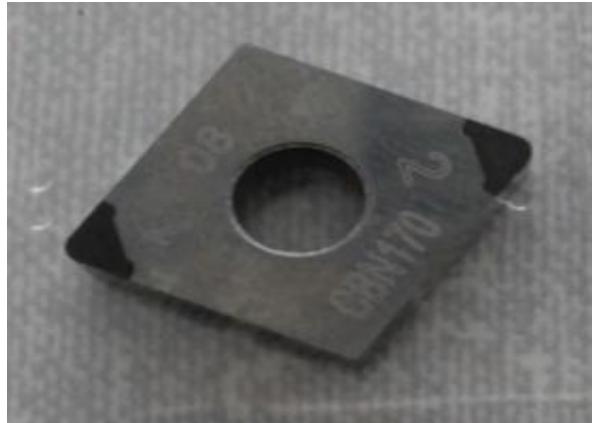
4.3 FERRAMENTAS DE CORTE

Para realização dos ensaios, foram utilizadas duas ferramentas de corte: uma de CBN e outra de metal duro revestida por $\text{TiCN} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$.

4.3.1 Ferramenta 1: Nitreto Cúbico de Boro do fabricante Seco Tools

A ferramenta de CBN utilizada foi doada pela Fabricante Seco Tools e possui código CBN170, CNGA 120408E25-L1-U. Essa ferramenta possui 65% de nitreto cúbico de boro, com tamanho médio de grão de 2 micrômetro e um aglutinante de cerâmica ($\text{TiCN} + \text{SiC}_w$) e não apresenta revestimento. É recomendada para usinagem de materiais da classe ISO S, se encaixam nessa classe superligas resistentes ao calor (ligas à base de níquel, de ferro ou de cobalto) e também titânio (SECO, 2020). A ferramenta utilizada nos ensaios está ilustrada na figura 26.

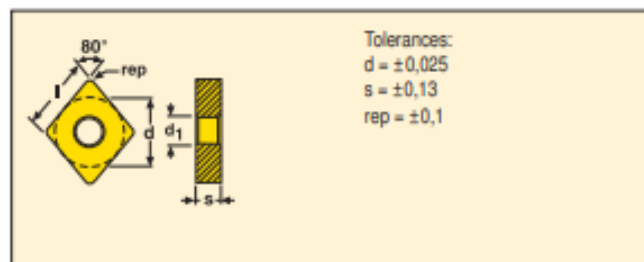
Figura 26 - Ferramenta CBN utilizada



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 27 mostra as dimensões e tolerâncias fornecidas pelo fabricante, onde $d = 12,7$ mm, $I = 12,9$ mm, $s = 4,76$, $d_1 = 5,15$ mm e $rep = 1,2$ mm.

Figura 27 - Medida da ferramenta de CBN da marca Seco



Fonte: Adaptado de Seco (2020).

A tabela 2 fornece valores recomendados, pelo fabricante, para utilização da ferramenta (para um $a_p < 0,5$ mm).

Tabela 2 – Recomendações de uso para a ferramenta Seco CBN170, CNGA 120408E25

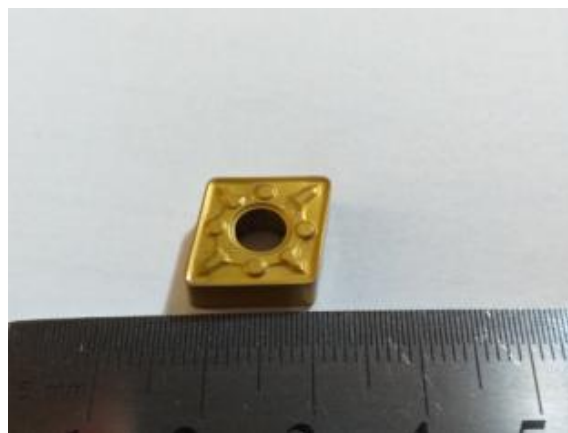
Avanço de corte ($f_n = \text{mm/rot}$)		Velocidade de corte ($V_C = \text{m/min}$)	
Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
0,05	0,24	120	280

Fonte: Adaptado de Seco (2020).

4.3.2 Ferramenta 2: Metal Duro revestida por $\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$ da Sandvik

A ferramenta de metal duro utilizada é recoberta por $\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$ (processo CVD) da marca Sandvik possui código CNMG120408-KM 3005. Trata-se de uma pastilha para usinagem média de ferros fundidos (material do tipo ISO K) (SECO, 2020). A ferramenta utilizada nos ensaios está representada nas figuras 28 e 29.

Figura 28 - Ferramenta com revestimento $\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$.



Fonte: Elaborado pelo autor

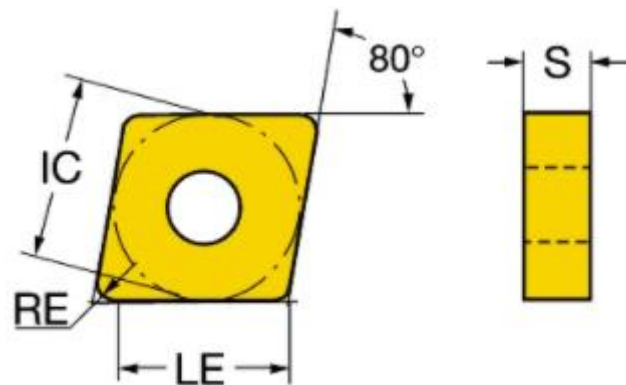
Figura 29 - Ferramenta de metal duro com revestimento CVD da marca Sandvik.



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 30 mostra suas dimensões, onde $IC = 12,7 \text{ mm}$, $RE = 0,794 \text{ mm}$, $LE = 12,096 \text{ mm}$ e $S = 4,763 \text{ mm}$.

Figura 30: Medida da ferramenta de metal duro da Sandvik



Fonte: Adaptado de Sandvik (2020).

A tabela 3 fornece valores recomendados, pelo fabricante, para utilização da ferramenta.

Tabela 3 – Recomendações de uso para a ferramenta da Sandvik

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.
3,00	0,20	6,00	0,35	0,15	0,50	215	195	250

Fonte: Sandvik (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, mostrado na figura 31.

Figura 31 – Centro de Torneamento CNC Romi modelo GL 240M



Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.2 Rugosímetro

Para a avaliação da qualidade superficial por meio da rugosidade foi utilizado um rugosímetro da marca Mahr modelo Marsurf M300 (figura 32 **Error! Reference source not found.**), com ponta apalpadora em formato de cone esférico feita de diamante e com raio de ponta de 2 μm . A fim de facilitar o processo de medição desse parâmetro o rugosímetro foi posicionado no corpo de prova com o mesmo ainda acoplado no centro de torneamento. Para esta análise foram utilizados os parâmetros Ra (rugosidade média) e Rt (rugosidade total), com comprimento de amostragem adotado (*cut-off*) de 0,25mm.

Figura 32 - Rugosímetro marca Mahr modelo Marsurf M300



Fonte: Elaborado pelo autor

Para cada ensaio de usinagem efetuado foram realizadas um total de 3 medidas de rugosidade, e só foram considerados os valores da rugosidade média (R_a) e da rugosidade total (R_t).

4.4.3 Microscópios

Foi realizada a determinação do desgaste das ferramentas, identificando qual seria o tipo de avaria que ocorreu devido aos esforços na usinagem. Para isso, foi utilizado o microscópio óptico da Marca Mahr, modelo MarVision MM20 (Figura 33). Quanto aos cavacos gerados, foi realizada uma análise qualitativa, ou seja, os cavacos foram classificados quanto ao tipo e quanto a forma.

Figura 33 - Microscópio óptico da Marca Mahr, modelo MarVision MM20



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Durante o processo de usinagem foram coletados dados de potência de corte, vibração e emissão acústica com o auxílio de um sistema de aquisição de dados computadorizado, o qual coletou os dados do processo em tempo real. Esse sistema permite a obtenção de quaisquer variáveis físicas que, mediante sensores ou transdutores apropriados, são convertidos em sinais elétricos proporcionais.

Para isto foi utilizado um aplicativo desenvolvido que adquirisse os dados com uma taxa de 4000 pontos por segundo. O programa foi desenvolvido através da plataforma do software Labview 7.1 2012, da *National Instruments*. O sistema possui uma placa de aquisição de dados, também da *National Instruments*, modelo NI PCI 6220, que foi acoplada no computador. A placa teve a função 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

Para a aquisição da potência consumida pelo motor do centro de torneamento foi utilizado um sensor de corrente, da marca LEM modelo AT 100 B10, mostrado na figura 34.

Figura 34 – Sensor de corrente, marca LEM modelo AT100 B10



Fonte: Elaborado pelo autor

O sensor, em função da corrente elétrica de uma das fases do motor, gera uma saída proporcional de 0 a 10 Volts de Corrente Contínua (VCC), essa saída é armazenada pelo software no computador. Como o sinal adquirido pelo sistema tem uma saída proporcional em

volts é necessário converter o mesmo para ampères. O fabricante do sensor fornece a equação 7 para a transformação do dado adquirido em volts para ampères.

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

Na qual:

I = corrente de uma das fases em Ampères;

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

Substituindo o valor da corrente, o valor da tensão de fase do motor do centro de usinagem (220 V) e o fator de potência (0,92) do motor, na equação 8 que foi utilizada para transformar o sinal adquirido em volts para potência consumida em watts e, multiplicado toda a equação por $\sqrt{3}$, visto que motor utilizado é trifásico, obtêm-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 da potência de corte obtido foi possível calcular a força de corte (F_c) e a pressão específica de corte (K_s) por meio das equações 10 e 11, respectivamente. Onde 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

Para a aquisição dos valores de vibração foi utilizado um sensor piezelétrico e um amplificador de sinal com saída retificada em RMS (valor quadrático médio), marca Vibro Control, modelo TV100, mostrado nas figuras 35 e 36.

Figura 35 – Sensor piezelétrico, marca Vibro Control, modelo TV100



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 36 - Sensor piezelétrico utilizado nos ensaios.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores obtidos em VCC (Volts de Corrente Contínua) foram convertidos depois para valores de velocidade em mm/s com o uso da equação 12, fornecida pelo próprio fabricante do sensor.

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

4.5.3 Emissão acústica

Para a aquisição de dados da emissão acústica foi usado um módulo de emissão acústica composto por um sensor (piezoelétrico) e um amplificador de sinal elétrico com saída retificada em RMS (valor quadrático médio), marca PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, modelo do sensor R15A, modelo do amplificador de sinal 1272-1000, mostrados na figura 37.

Figura 37 – Módulo de emissão acústica (1), sensor (2) e amplificador (3)



Fonte: Elaborado pelo autor

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

4.6 PROCEDIMENTOS E PROCESSO DE USINAGEM

Os parâmetros de corte utilizados foram: um avanço de 0,05 e 0,1 mm/rot (V_f), uma profundidade de corte de 0,25mm (ap) e um percurso de avanço de 100mm. A escolha desses valores para os parâmetros de corte se deu devido ao fato de serem valores comuns para operações de acabamento superficial. As velocidades de corte (V_c) utilizadas foram de 100 e 150m/min . Para cada combinação dos parâmetros foram realizados dois ensaios com cada ferramenta, ou seja, foi utilizado um planejamento de experimentos do tipo fatorial completo com três fatores, cada um com dois níveis, resultando em um total de 16 ensaios. A tabela 4 mostra um panorama geral das variáveis de entrada dos processos. Já o quadro 4 mostra em detalhes as condições para cada ensaio. Cada ensaio foi utilizado um nova aresta de corte da ferramenta.

Tabela 4- Variáveis de entrada

Parâmetro	Valores
Ferramenta	CBN e TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN
Velocidade de corte (m/min)	100 e 150
Avanço (mm/rot)	0,05 e 0,1

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 4 – Condições de cada ensaio

Ensaio	Ferramenta	f (mm/rot)	Ap (mm)	Vc (m/min)
1 e 2	CBN	0,05	0,25	100
3 e 4	CBN	0,1	0,25	100
5 e 6	CBN	0,05	0,25	150
7 e 8	CBN	0,1	0,25	150
9 e 10	Metal duro	0,05	0,25	100
11 e 12	Metal duro	0,1	0,25	100
13 e 14	Metal duro	0,05	0,25	150
15 e 16	Metal duro	0,1	0,25	150

Fonte: Elaborado pelo autor

A cada variação e passada da ferramenta, foram obtidas amostras de cavaco, dados de potência de corte, vibração, emissão acústica, rugosidade.

4.7 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE DADOS

A partir dos dados obtidos, foram utilizados softwares de computadores para analisar a presença de correlações entre as variáveis medidas no processo. Além disso, também foi analisado a relação entre as ferramentas escolhidas para o ensaio e outras variáveis como rugosidade do material, potência consumida, emissão acústica e vibração.

Os dados foram armazenados e convertidos para unidades convenientes no software *Microsoft Excel*. Em seguida, foi feita a análise estatística, análise de variância, dos dados através do software *Minitab*, onde foi possível realizar a comparação e verificar a relação entre diversas variáveis, comparando de forma isolada as diferentes ferramentas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

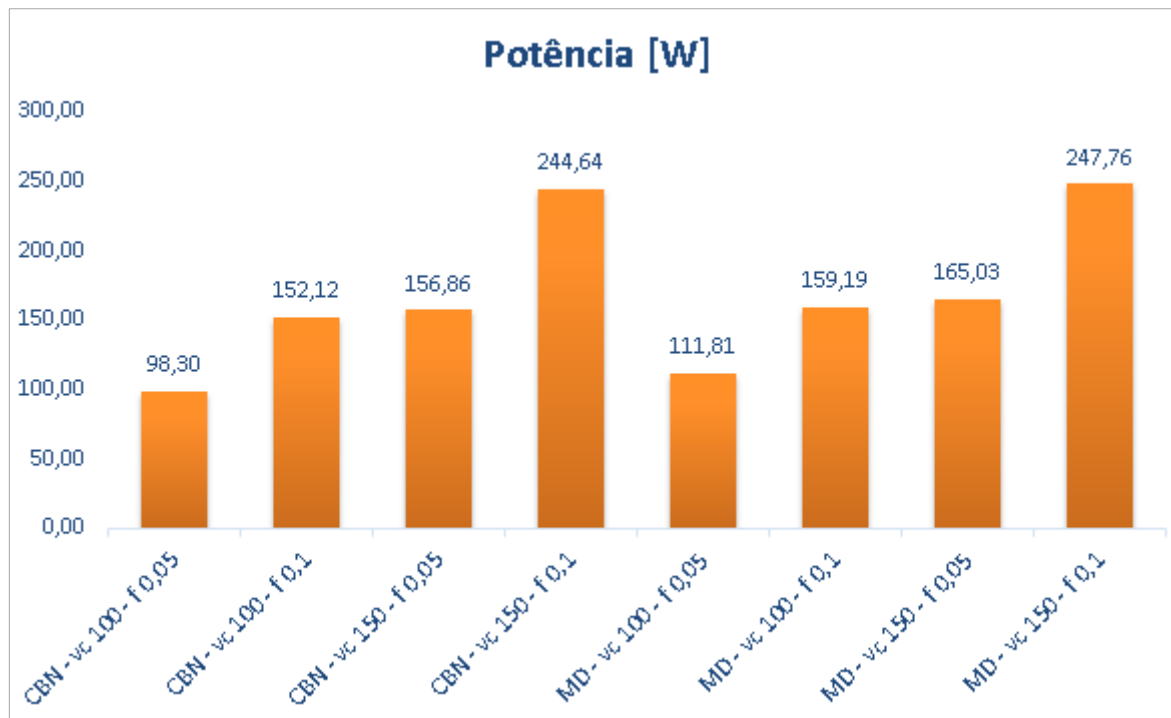
As influências da velocidade de corte, do avanço e da ferramenta sobre a potência, a vibração, a emissão acústica, as rugosidade total e média, os tipos e formas dos cavacos, o desgaste das ferramentas, o desgaste de flanco, a força de corte e a pressão específica de corte serão apresentadas a seguir como resultado deste trabalho. Os três primeiros parâmetros foram captados com uma aquisição de 4000 pontos por segundo pelo software *Labview* e tratados no software *Matlab*, onde foi considerado o valor médio para cada ensaio.

Para avaliar se houve interação entre as variáveis de entrada (velocidade de corte, avanço e tipo de ferramenta) e os parâmetros de saída do processo foi utilizado o software *Minitab* 17, que possui métodos com uma confiabilidade de 95%. Foram considerados significativos estatisticamente aqueles parâmetros ou a combinação deles que apresentaram um valor de valor-P (indicativo de que 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, indica que o efeito é determinado número de vezes maior que o erro medido. Uma vez que o valor-F for maior que 2 é um indicativo que o efeito do fator em cima da variável resposta é no mínimo duas vezes maior que o erro medido. Além disso, todos os dados são normais (distribuição normal).

5.1 EFEITOS PARA A POTÊNCIA DE CORTE

O valor médio da potência consumida durante cada combinação de entrada está descrito na figura 38. É possível observar que a potência consumida é maior com o aumento do avanço e da velocidade de corte. Além disso, para a ferramenta de metal duro a potência foi ligeiramente maior que para a ferramenta de CBN.

Figura 38 – Média da potência consumida para cada condição de entrada dos ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor

O quadro 5 mostra os valores obtidos pela análise de variância e das influências sobre a média da potência. A velocidade de corte e o avanço influenciaram de forma significativa estatisticamente. Assim como, a interação de segunda ordem entre velocidade corte e avanço. Parâmetros em destaque no quadro 5.

Quadro 5 – Análise de variância para a potência de corte

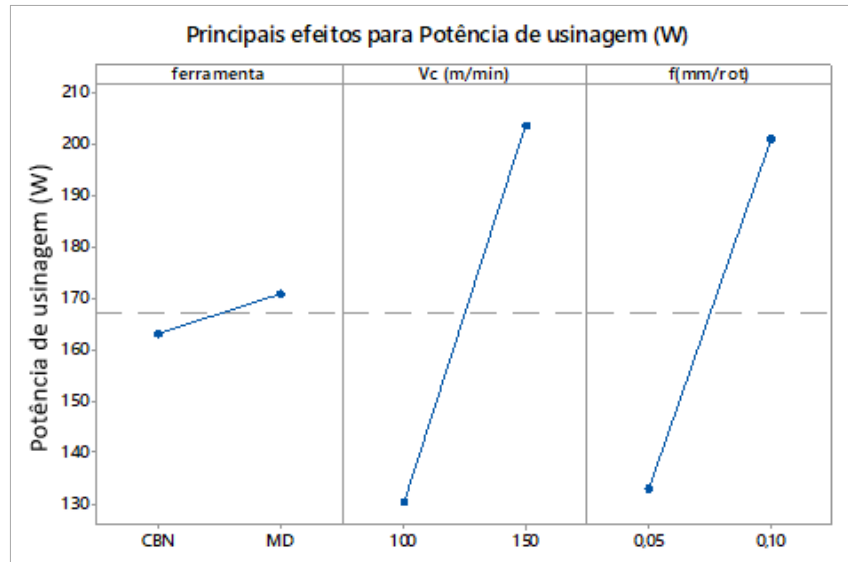
Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor-F	Valor-P
Modelo	7	41408,5	5915,5	79,55	0,000
Linear	3	40152,2	13384,1	179,99	0,000
ferramenta	1	253,8	253,8	3,41	0,102
Vc (m/min)	1	21442,5	21442,5	288,36	0,000
f (mm/rot)	1	18455,9	18455,9	248,20	0,000
Interações de 2ª ordem	3	1255,8	418,6	5,63	0,023
ferramenta*Vc (m/min)	1	21,6	21,6	0,29	0,605
ferramenta*f (mm/rot)	1	33,1	33,1	0,45	0,523
Vc (m/min)*f (mm/rot)	1	1201,1	1201,1	16,15	0,004
Interações de 3ª ordem	1	0,5	0,5	0,01	0,938
ferramenta*Vc (m/min)*f (mm/rot)	1	0,5	0,5	0,01	0,938
Erro	8	594,9	74,4		
Total	15	42003,4			

Fonte: Elaborado pelo autor

As influências dos fatores tipo de ferramenta, avanço e velocidade de corte sobre a média da potência de corte durante os processos de torneamento do aço AISI 52100, estão

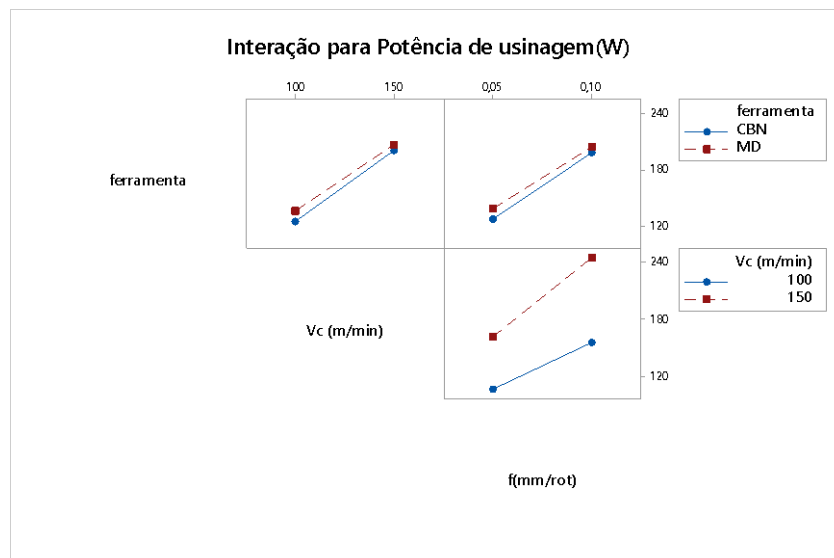
demonstradas na figura 39. Já a figura 40 apresenta as influências das interações de segunda ordem sobre a potência.

Figura 39 – Média da potência consumida nos ensaios realizados



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 40 – Influência das interações de segunda ordem sobre a potência consumida nos ensaios realizados



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 39 expressa, através de gráficos, a influência dos parâmetros de entrada na potência consumida. A velocidade de corte e o avanço possuem grande inclinação da reta, o

que significa que possuem uma maior influência no parâmetro de saída analisado, a potência consumida. Para maiores velocidades de corte e avanços tem-se maiores áreas de contato entre a ferramenta e a peça durante o processo de usinagem, o que acaba elevando o valor da potência consumida. Embora não apresente uma grande inclinação da reta o valor-F para a ferramenta, visto no quadro 5, é maior que dois, o que indica uma relevância na análise.

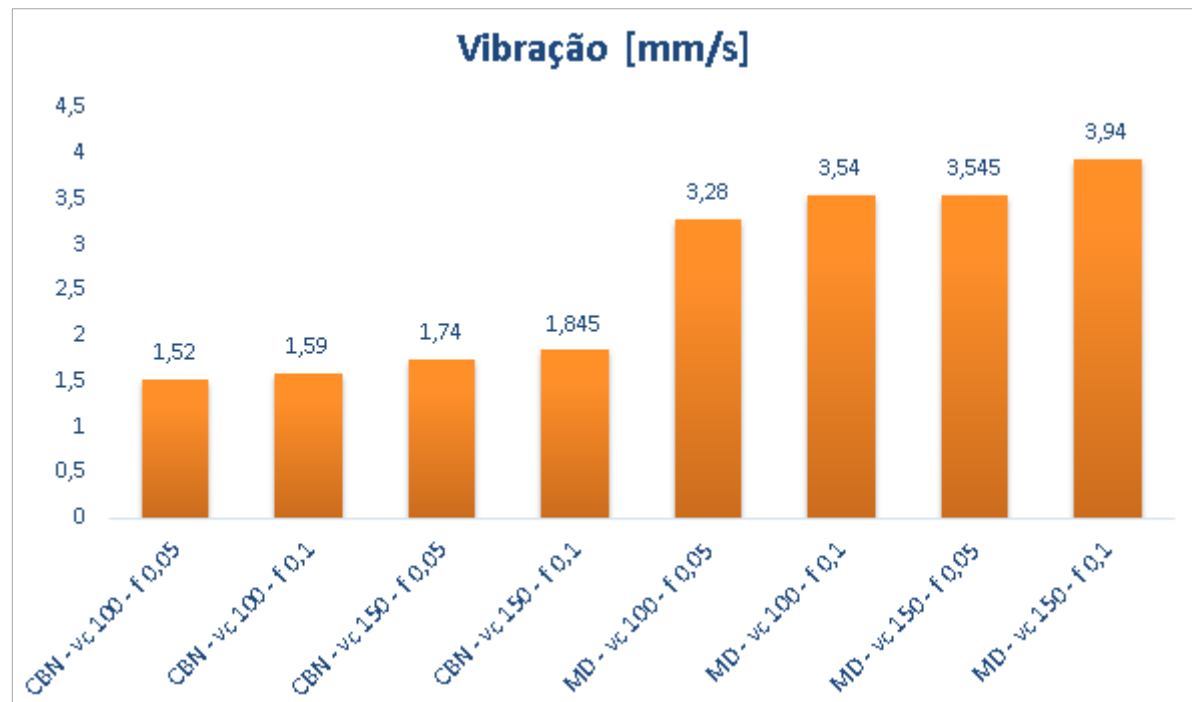
Já a figura 40 expressa, por meio de gráficos, a interação entre dois parâmetros de entrada. Quando as retas dos gráficos são concorrentes, ou seja, possuem um ponto em comum ou tendem a possuir um ponto em comum pode-se dizer que há uma interação significativa estaticamente. O gráfico velocidade de corte com avanço possuem uma grande tendência a se cruzarem na parte inferior, enquanto nos gráficos de ferramenta com velocidade de corte e ferramenta com avanço as linhas estão mais próximas com uma menor tendência de se cruzarem na parte superior.

Pela figura 38 pode-se observar que combinação da ferramenta de CBN com velocidade de corte de 100 m/min e avanço de 0,05 mm/rot gerou a menor potência consumida. Enquanto, a combinação da ferramenta de metal duro com velocidade de 150 m/min e avanço de 0,1 mm/rot gerou a maior potência consumida.

5.2 EFEITOS PARA A VIBRAÇÃO

O valor médio das vibrações durante cada combinação de entrada está descrito na figura 41. É possível observar que as vibrações cresceram com o aumento do avanço e da velocidade de corte. Além disso, a ferramenta de metal duro apresentou uma maior vibração, mais que duas vezes, quando comparada a ferramenta de CBN.

Figura 41 - Média da vibração para cada condição de entrada dos ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor

O quadro 6 mostra os valores obtidos pela análise de variância e das influências sobre a média da vibração. Todos os parâmetros lineares influenciaram de forma significativa estaticamente. Assim como, a interação de segunda ordem entre ferramenta e avanço. Parâmetros em destaque no quadro 6.

Quadro 6 – Análise de variância para a vibração

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor-F	Valor-P
Modelo	7	15,0515	2,1502	288,14	0,000
Linear	3	14,9751	4,9917	668,91	0,000
ferramenta	1	14,4780	14,4780	1940,10	0,000
Vc (m/min)	1	0,3249	0,3249	43,54	0,000
f(mm/rot)	1	0,1722	0,1722	23,08	0,001
Interações de 2ª ordem	3	0,0739	0,0246	3,30	0,079
ferramenta*Vc (m/min)	1	0,0090	0,0090	1,21	0,303
ferramenta*f(mm/rot)	1	0,0576	0,0576	7,72	0,024
Vc (m/min)*f(mm/rot)	1	0,0072	0,0072	0,97	0,354
Interações de 3ª ordem	1	0,0025	0,0025	0,34	0,579
ferramenta*Vc (m/min)*f(mm/rot)	1	0,0025	0,0025	0,34	0,579
Erro	8	0,0597	0,0075		
Total	15	15,1112			

Fonte: Elaborado pelo autor

As influências dos fatores tipo de ferramenta, avanço e velocidade de corte sobre a média da vibração durante os processos de torneamento do aço AISI 52100, estão demonstradas na

figura 42. Já a figura 43 apresenta as influências das interações de segunda ordem sobre a vibração.

Figura 42 – Média da vibração nos ensaios realizados

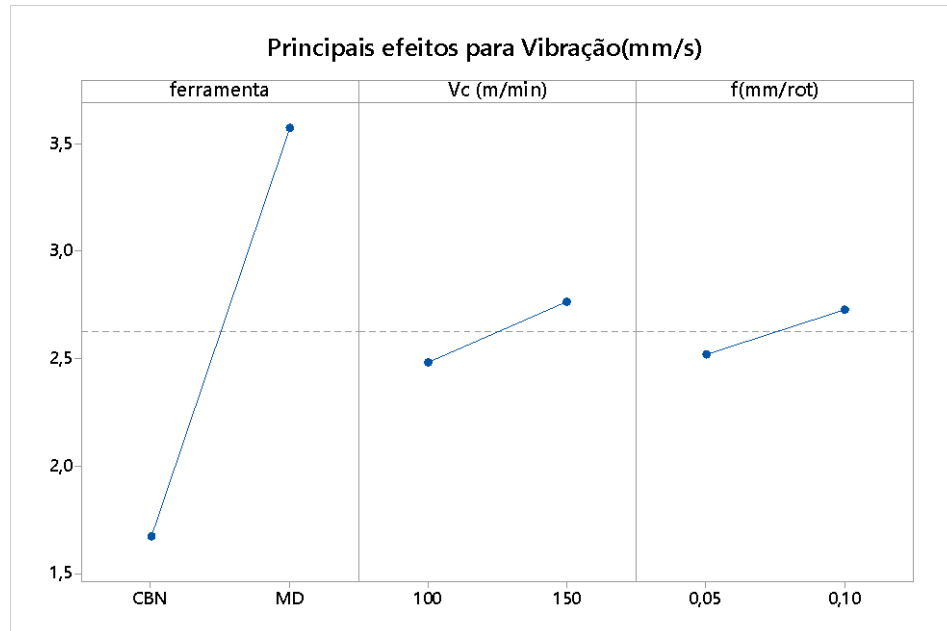
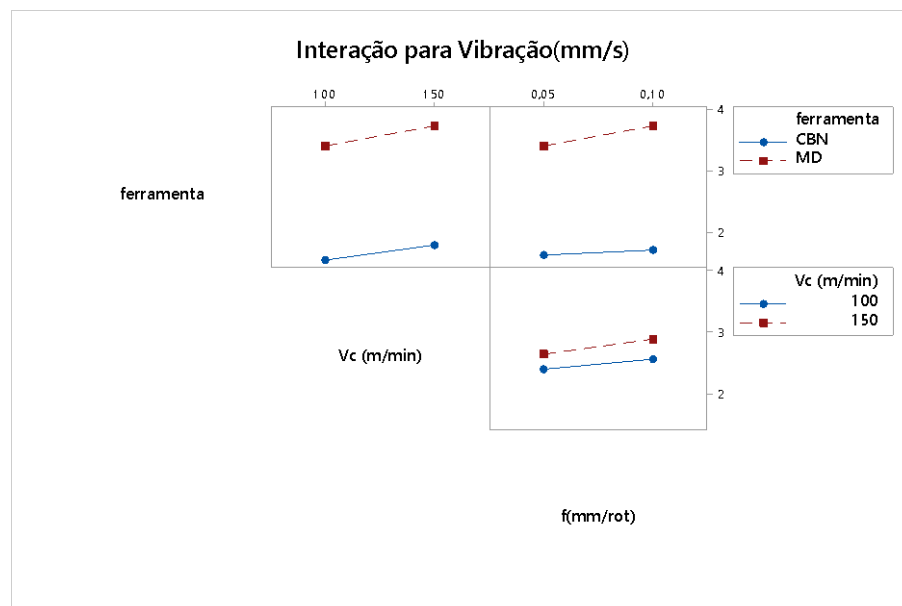


Figura 43 – Influência das interações de segunda ordem sobre a vibração nos ensaios realizados



A figura 42 expressa, através de gráficos, a influência dos parâmetros de entrada na vibração. Assim como para a potência consumida, a velocidade de corte e o avanço possuem uma influência no parâmetro de saída analisado, a vibração. Entretanto, neste caso a ferramenta apresenta a maior influência sobre a vibração medida, fato esse comprovado pela inclinação da reta e pelo valor-F. Para maiores velocidades de corte e avanços tem-se maiores áreas de contato entre a ferramenta e a peça durante o processo de usinagem, o que acaba elevando a vibração. Em relação ao tipo de ferramenta, a de CBN apresenta uma dureza muito superior à de metal duro com revestimento, como consequência, tem-se um corte muito melhor, um desgaste e um atrito durante a usinagem menores, gerando vibrações em níveis mais baixo.

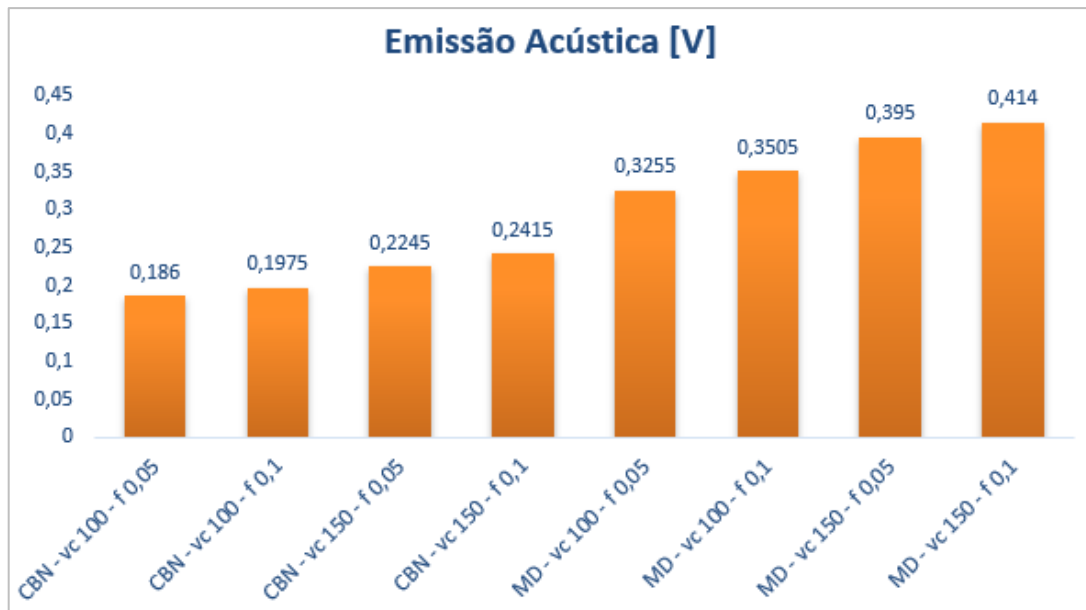
Já a figura 43 expressa, por meio de gráficos, a interação entre dois parâmetros de entrada. Quando as retas dos gráficos são concorrentes, ou seja, possuem um ponto em comum ou tendem a possuir um ponto em comum pode-se dizer que há uma interação significativa estaticamente. O gráfico ferramenta com avanço possui uma tendência a se cruzar na parte inferior, enquanto nos gráficos de ferramenta com velocidade de corte e velocidade de corte com avanço as linhas são praticamente paralelas entre si, indicando que não há uma interação significativa estaticamente.

Pela figura 41 pode-se observar que a combinação da ferramenta de CBN com velocidade de corte de 100 m/min e avanço de 0,05 mm/rot gerou a menor vibração. Enquanto, a combinação da ferramenta de metal duro com velocidade de 150 m/min e avanço de 0,1 mm/rot gerou a maior vibração.

5.3 EFEITOS PARA A EMISSÃO ACÚSTICA

O valor médio da emissão acústica durante cada combinação de entrada está descrito na figura 44. É possível observar que as emissões acústicas cresceram com o aumento do avanço e da velocidade de corte. Além disso, a ferramenta de metal duro apresentou uma maior emissão acústica, quando comparada a ferramenta de CBN.

Figura 44 - Média da emissão acústica para cada condição de entrada dos ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor

O quadro 7 mostra os valores obtidos pela análise de variância e das influências sobre a média da emissão acústica. Todos os parâmetros lineares influenciaram de forma significativa estaticamente. Assim como, as interações de segunda ordem entre ferramenta e velocidade de corte, e ferramenta e avanço. Para essa variável nota-se também que a interação de terceira ordem foi significativa estaticamente. Parâmetros em destaque no quadro 7.

Quadro 7 – Análise de variância para a emissão acústica

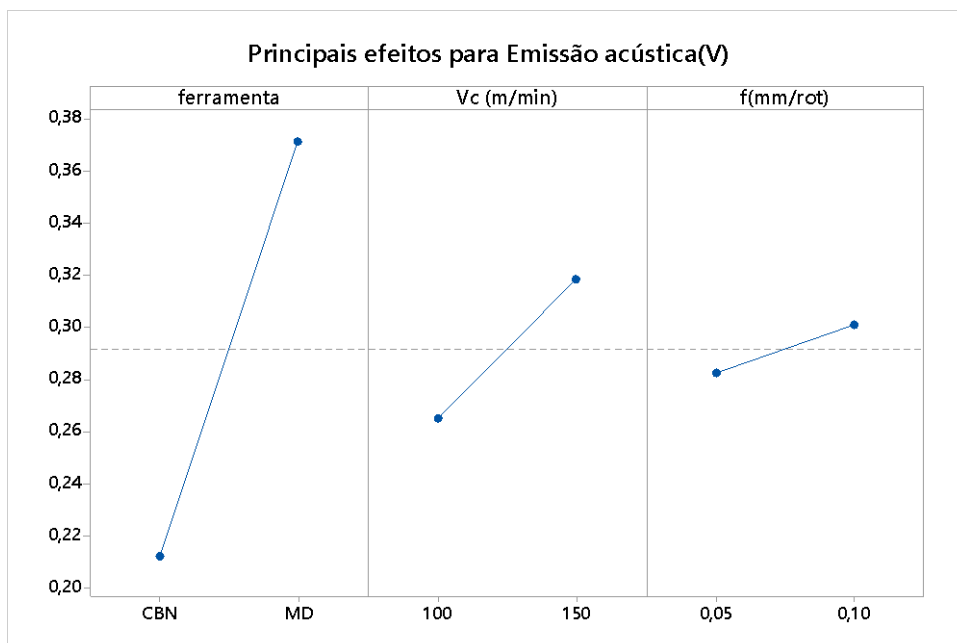
Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor-F	Valor-P
Modelo	7	0,114620	0,016374	1668,72	0,000
Linear	3	0,113889	0,037963	3868,85	0,000
ferramenta	1	0,100965	0,100965	10289,43	0,000
Vc (m/min)	1	0,011610	0,011610	1183,19	0,000
f(mm/rot)	1	0,001314	0,001314	133,92	0,000
Interações de 2ª ordem	3	0,000698	0,000233	23,70	0,000
ferramenta*Vc (m/min)	1	0,000638	0,000638	64,97	0,000
ferramenta*f(mm/rot)	1	0,000060	0,000060	6,12	0,038
Vc (m/min)*f(mm/rot)	1	0,000000	0,000000	0,01	0,938
Interações de 3ª ordem	1	0,000033	0,000033	3,37	0,104
ferramenta*Vc (m/min)*f(mm/rot)	1	0,000033	0,000033	3,37	0,104
Erro	8	0,000079	0,000010		
Total	15	0,114698			

Fonte: Elaborado pelo autor

As influências dos fatores tipo de ferramenta, avanço e velocidade de corte sobre a média da emissão acústica durante os processos de torneamento do aço AISI 52100, estão

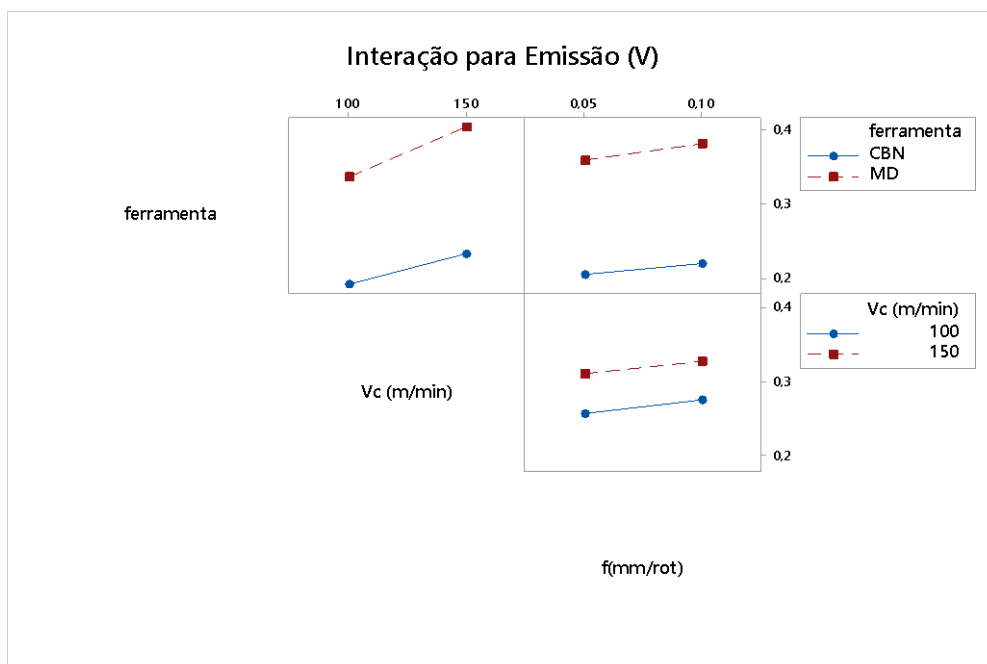
demonstradas na figura 45. Já a figura 46 apresenta as influências das interações de segunda ordem sobre o mesmo parâmetro de saída.

Figura 45 – Média da emissão acústica nos ensaios realizados



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 46 – Influência das interações de segunda ordem sobre a emissão acústica nos ensaios realizados



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 45 expressa, através de gráficos, a influência dos parâmetros de entrada na emissão. Assim como para a vibração, os três parâmetros de entrada lineares possuem uma influência no parâmetro de saída analisado. Sendo que, neste caso a ferramenta apresenta a maior influência sobre a emissão acústica medida, fato esse comprovado pela inclinação da reta e pelo valor-F. Para maiores velocidades de corte e avanços tem-se maiores áreas de contato entre a ferramenta e a peça durante o processo de usinagem, o que acaba elevando a emissão. Em relação ao tipo de ferramenta, a de CBN apresenta uma dureza muito superior à de metal duro com revestimento, como consequência, tem-se um corte muito melhor, um desgaste e um atrito durante a usinagem menores, gerando emissões em níveis mais baixo.

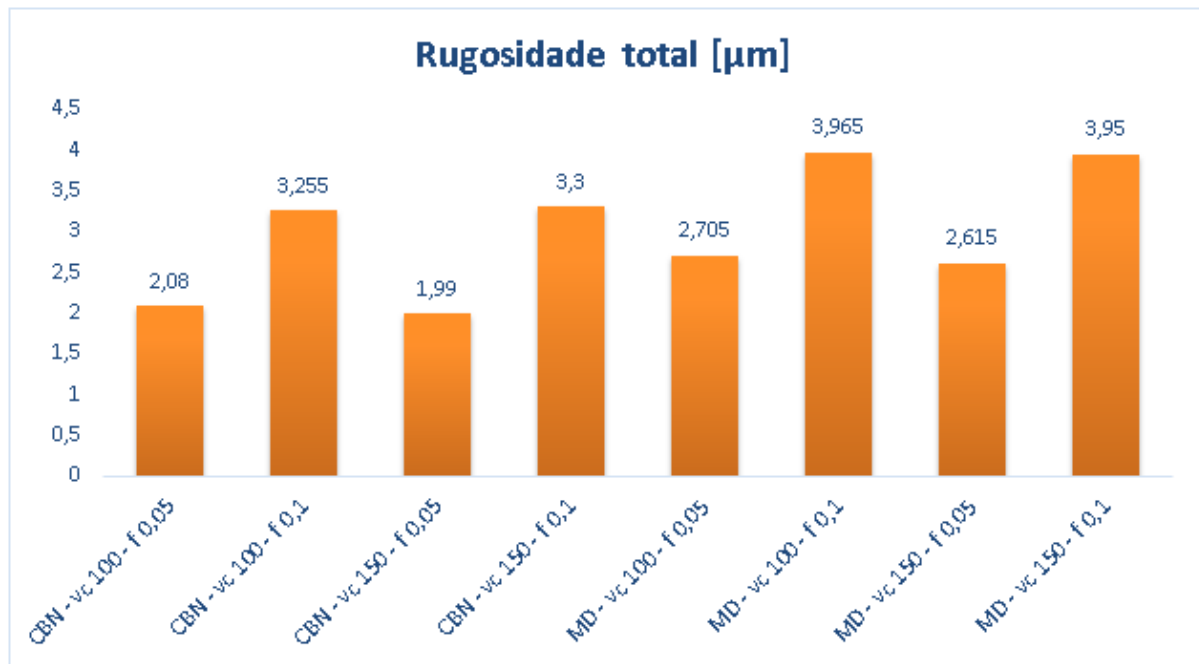
Já a figura 46 expressa, por meio de gráficos, a interação entre dois parâmetros de entrada. Quando as retas dos gráficos são concorrentes, ou seja, possuem um ponto em comum ou tendem a possuir um ponto em comum pode-se dizer que há uma interação significativa estaticamente. O gráfico ferramenta com velocidade de corte possui uma maior tendência a se cruzar na parte inferior, já o gráfico de ferramenta com avanço possui uma baixa tendência a se cruzar na parte inferior e o de velocidade de corte com avanço apresenta linhas são praticamente paralelas entre si, indicando que não há uma interação significativa estaticamente.

Pela figura 44 pode-se observar que a combinação da ferramenta de CBN com velocidade de corte de 100 m/min e avanço de 0,05 mm/rot gerou a menor emissão. Enquanto, a combinação da ferramenta de metal duro com velocidade de 150 m/min e avanço de 0,1 mm/rot gerou a maior emissão.

5.4 EFEITOS PARA A RUGOSIDADE TOTAL (RT)

O valor médio da rugosidade total medida após o ensaio de cada combinação de entrada está descrito na figura 47. É possível observar que a rugosidade total cresce com o aumento do avanço e que a velocidade de corte tem pouca influência sobre esse parâmetro de saída. Além disso, a ferramenta de metal duro apresentou uma rugosidade total maior, quando comparada a ferramenta de CBN.

Figura 47 - Média da rugosidade total para cada condição de entrada dos ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor

O quadro 8 mostra os valores obtidos pela análise de variância e das influências sobre a média da rugosidade total. O tipo da ferramenta e o avanço influenciaram de forma significativa estaticamente. E nenhuma das interações de segunda ordem foi significativa estaticamente. Os parâmetros lineares significativos estão em destaque no quadro 8.

Quadro 8 – Análise de variância para a rugosidade total

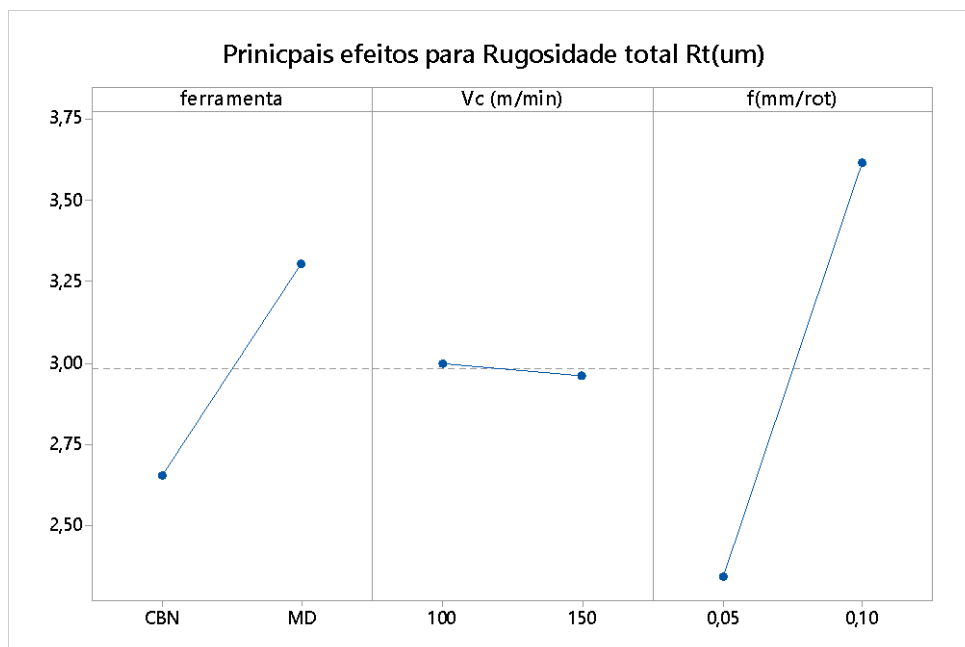
Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor-F	Valor-P
Modelo	7	8,17610	1,16801	204,02	0,000
Linear	3	8,16025	2,72008	475,12	0,000
ferramenta	1	1,70302	1,70302	297,47	0,000
Vc (m/min)	1	0,00562	0,00562	0,98	0,351
f(mm/rot)	1	6,45160	6,45160	1126,92	0,000
Interações de 2ª ordem	3	0,01495	0,00498	0,87	0,495
ferramenta*Vc (m/min)	1	0,00090	0,00090	0,16	0,702
ferramenta*f(mm/rot)	1	0,00303	0,00303	0,53	0,488
Vc (m/min)*f(mm/rot)	1	0,01103	0,01103	1,93	0,203
Interações de 3ª ordem	1	0,00090	0,00090	0,16	0,702
ferramenta*Vc (m/min)*f(mm/rot)	1	0,00090	0,00090	0,16	0,702
Erro	8	0,04580	0,00573		
Total	15	8,22190			

Fonte: Elaborado pelo autor

As influências dos fatores tipo de ferramenta, avanço e velocidade de corte sobre a média da rugosidade total durante os processos de torneamento do aço AISI 52100, estão

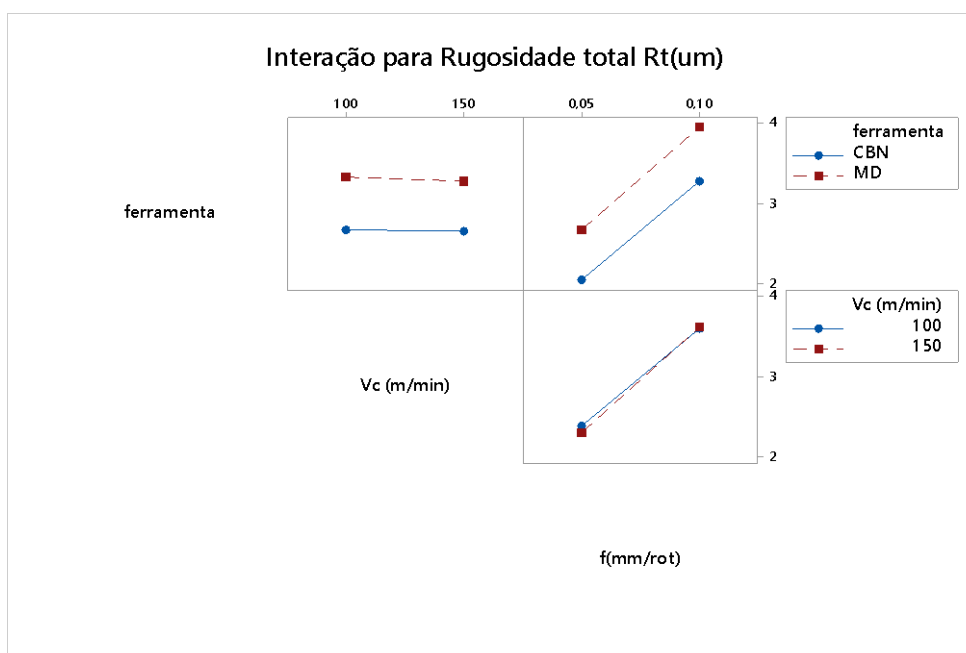
demonstradas na figura 48. Já a figura 49 apresenta as influências das interações de segunda ordem sobre o mesmo parâmetro de saída.

Figura 48 – Média da rugosidade total nos ensaios realizados



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 49 – Influência das interações de segunda ordem sobre a rugosidade total nos ensaios realizados



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 48 expressa, através de gráficos, a influência dos parâmetros de entrada na rugosidade total. Para essa variável de saída temos o tipo de ferramenta e o avanço influenciando a rugosidade total. O avanço apresenta a maior influência sobre a rugosidade total medida, fato esse comprovado pela inclinação da reta e pelo valor-F. A rugosidade é uma função direta do avanço, ou seja, quanto maior o avanço, maior a rugosidade observada. Em relação ao tipo de ferramenta, a de CBN apresenta uma dureza muito superior à de metal duro com revestimento, como consequência, tem-se um corte muito melhor, gerando rugosidades menores. É importante lembrar que a rugosidade total é sensível a defeitos pontuais e seu cálculo é feito mediante a diferença entre o ponto mais baixo e o mais alto medidos na superfície da peça usinada.

Apesar de a ferramenta CBN 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.

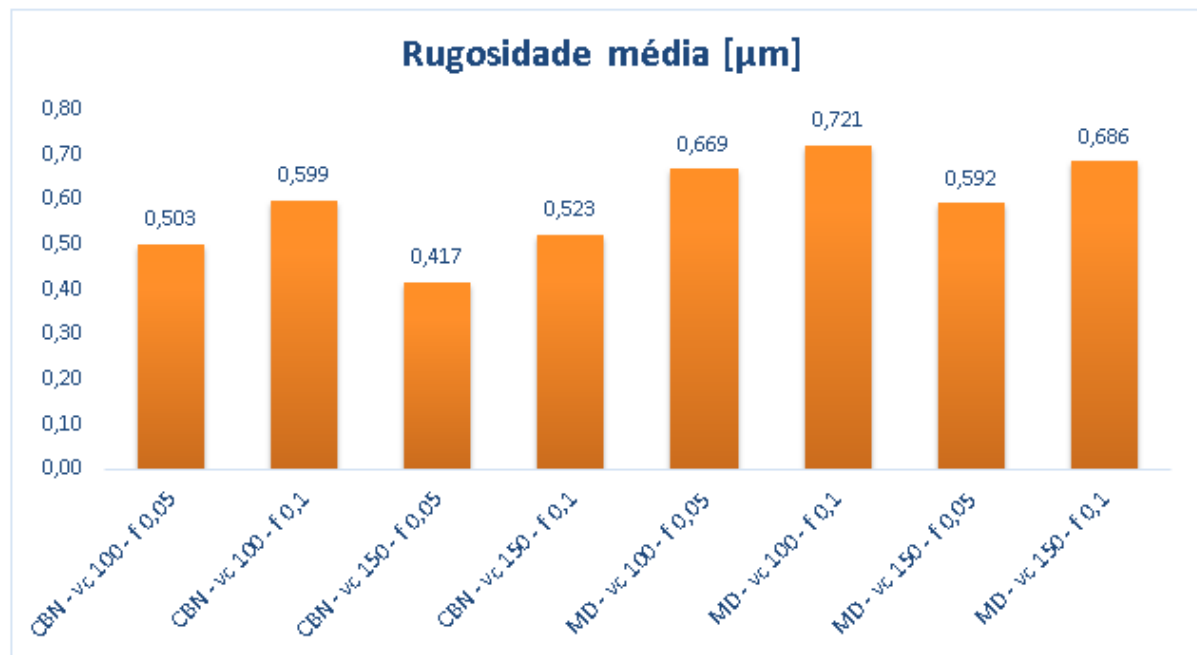
Já a figura 49 expressa, por meio de gráficos, a interação entre dois parâmetros de entrada. Quando as retas dos gráficos são concorrentes, ou seja, possuem um ponto em comum ou tendem a possuir um ponto em comum pode-se dizer que há uma interação significativa estaticamente. O gráfico de velocidade de corte com avanço possui uma tendência a se cruzar na parte superior, o que pode ser explicado por um valor-F muito próximo a 2,0. Já os gráficos de ferramenta com velocidade de corte, e ferramenta com avanço apresentam linhas praticamente paralelas entre si, indicando que não há uma interação significativa estaticamente.

Pela figura 47 pode-se observar que a combinação da ferramenta de CBN com velocidade de corte de 150 m/min e avanço de 0,05 mm/rot gerou a menor rugosidade total. Enquanto, a combinação da ferramenta de metal duro com velocidade de 100 m/min e avanço de 0,1 mm/rot gerou a maior rugosidade total.

5.5 EFEITOS PARA A RUGOSIDADE MÉDIA (RA)

O valor médio da rugosidade média medida após o ensaio de cada combinação de entrada está descrito na figura 50. É possível observar que a rugosidade média cresce com o aumento do avanço e diminui com o aumento da velocidade de corte. Além disso, a ferramenta de metal duro apresentou uma rugosidade média maior, quando comparada a ferramenta de CBN.

Figura 50 - Média da rugosidade média para cada condição de entrada dos ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor

O quadro 9 mostra os valores obtidos pela análise de variância e das influências sobre a média da rugosidade média. Todos os parâmetros lineares influenciaram de forma significativa estaticamente. E nenhuma das interações de segunda ordem foi significativa estaticamente. Os parâmetros lineares significativos estão em destaque no quadro 9.

Quadro 9 – Análise de variância para a rugosidade média

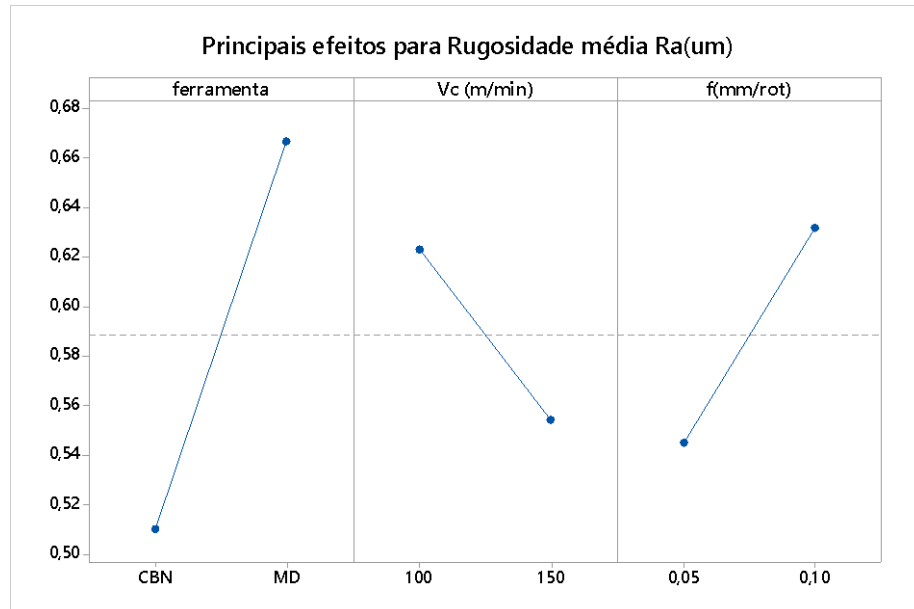
Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor-F	Valor-P
Modelo	7	0,149808	0,021401	37,69	0,000
Linear	3	0,147465	0,049155	86,58	0,000
ferramenta	1	0,098282	0,098282	173,11	0,000
Vc (m/min)	1	0,018906	0,018906	33,30	0,000
f(mm/rot)	1	0,030276	0,030276	53,33	0,000
Interações de 2ª ordem	3	0,002088	0,000696	1,23	0,362
ferramenta*Vc (m/min)	1	0,000625	0,000625	1,10	0,325
ferramenta*f(mm/rot)	1	0,000812	0,000812	1,43	0,266
Vc (m/min)*f(mm/rot)	1	0,000650	0,000650	1,15	0,316
Interações de 3ª ordem	1	0,000256	0,000256	0,45	0,521
ferramenta*Vc (m/min)*f(mm/rot)	1	0,000256	0,000256	0,45	0,521
Erro	8	0,004542	0,000568		
Total	15	0,154350			

Fonte: Elaborado pelo autor

As influências dos fatores tipo de ferramenta, avanço e velocidade de corte sobre a média da rugosidade média durante os processos de torneamento do aço AISI 52100, estão

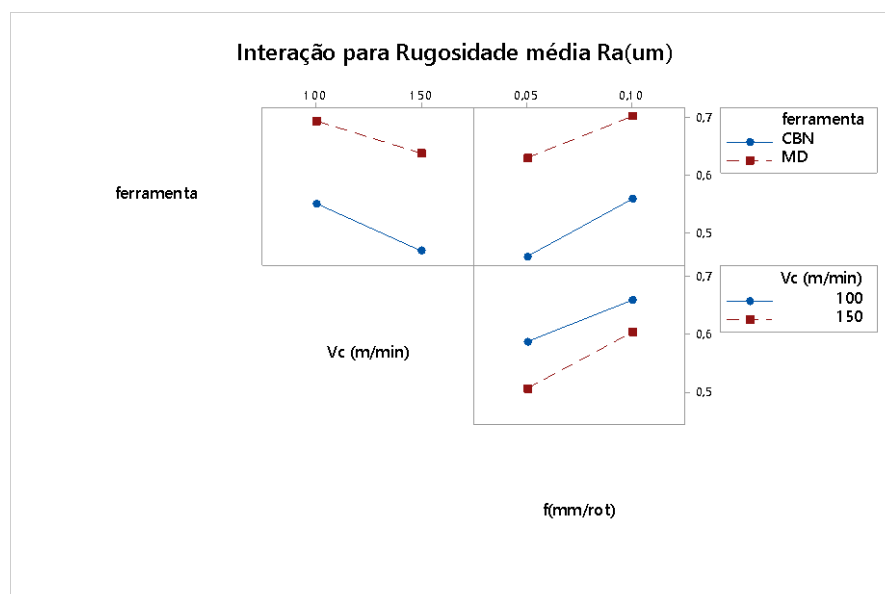
demonstradas na figura 51. Já a figura 52 apresenta as influências das interações de segunda ordem sobre o mesmo parâmetro de saída.

Figura 51 – Média da rugosidade média nos ensaios realizados



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 52 – Influência das interações de segunda ordem sobre a rugosidade média nos ensaios realizados



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 51 expressa, através de gráficos, a influência dos parâmetros de entrada na rugosidade média. Assim como para a rugosidade total, a ferramenta e o avanço possuem uma

influência no parâmetro de saída analisado. Entretanto, para a rugosidade média também temos a influência da velocidade de corte. O tipo de ferramenta apresenta a maior influência sobre a rugosidade média, fato esse comprovado pela inclinação da reta e pelo valor-F. A rugosidade é uma função direta do avanço, ou seja, quanto maior o avanço, maior a rugosidade observada. Em relação ao tipo de ferramenta, a de CBN apresenta uma dureza muito superior à de metal duro com revestimento, como consequência, tem-se um corte muito melhor, gerando rugosidades menores. Outro fator importante é com relação ao desgaste. Tem-se um desgaste muito menor na ferramenta de CBN o que contribui para rugosidades menores. Já com relação a velocidade corte, observa-se que com aumento da velocidade, mais material passa pela ferramenta em um mesmo intervalo de tempo, gerando um aumento da temperatura, que por sua vez tem um efeito benéfico na rugosidade, já que diminui a resistência do material e, consequentemente, possibilita um melhor acabamento superficial.

Apesar de a ferramenta CBN apresentar um melhor desempenho neste caso, ambas as ferramentas estão dentro da faixa de retificação (o valor de referência é de uma rugosidade média de até 1 μm sendo um valor aceitável e abaixo de 0,6 μm como um valor excelente), 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.

Já a figura 52 expressa, por meio de gráficos, a interação entre dois parâmetros de entrada. Quando as retas dos gráficos são concorrentes, ou seja, possuem um ponto em comum ou tendem a possuir um ponto em comum pode-se dizer que há uma interação significativa estaticamente. Todos os gráficos apresentam linhas praticamente paralelas entre si, indicando que não há uma interação significativa estaticamente.

Pela figura 50 pode-se observar que a combinação da ferramenta de CBN com velocidade de corte de 150 m/min e avanço de 0,05 mm/rot gerou a menor rugosidade média. Enquanto, a combinação da ferramenta de metal duro com velocidade de 100 m/min e avanço de 0,1 mm/rot gerou a maior rugosidade média.

5.6 EFEITOS PARA DESGASTE DE FLANCO

O desgaste referente a cada ferramenta, para todas as condições das variáveis de entrada, foi medido e dividido pelo comprimento usinado no respectivo ensaio. Esse artifício da divisão foi utilizado de forma a compensar os valores a fim de permitir a comparação dos valores de cada ensaio, uma vez que não foi possível executar o ensaio de vida no laboratório. Os valores

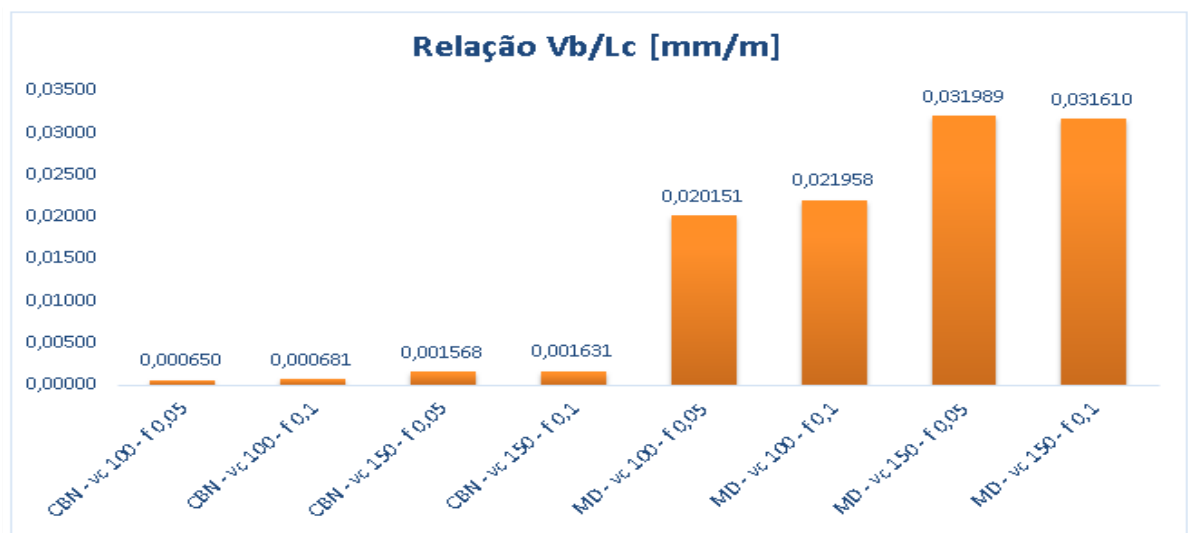
estão apresentados na tabela 5 e na figura 53, é possível observar um comparativo entre cada uma das condições. De maneira geral, é possível concluir que para as ferramentas de CBN os desgastes apresentaram menores níveis.

Tabela 5 – Desgaste de flanco relativo, comprimento usinado e a relação entre eles

Condição	Desgaste medido Vb (mm)	Comprimento Usinado Lc (m)	Relação (mm/m)
CBN - vc 100 - f 0,05	0,042	64,654	0,000650
CBN - vc 100 - f 0,1	0,022	32,327	0,000681
CBN - vc 150 - f 0,05	0,1	63,774	0,001568
CBN - vc 150 - f 0,1	0,052	31,887	0,001631
MD - vc 100 - f 0,05	1,294	64,214	0,020151
MD - vc 100 - f 0,1	0,705	32,107	0,021958
MD - vc 150 - f 0,05	2,026	63,335	0,031989
MD - vc 150 - f 0,1	1,001	31,667	0,031610

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 53 – Média da relação desgaste da ferramenta por comprimento usinado para cada condição de entrada dos ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor

O quadro 10 mostra os valores obtidos pela análise de variância e das influências sobre a média do desgaste de flanco relativo. O tipo da ferramenta e a velocidade de corte influenciaram de forma significativa estaticamente. Assim como a interação de segunda ordem entre ferramenta e velocidade de corte. Os parâmetros significativos estão em destaque no quadro 10.

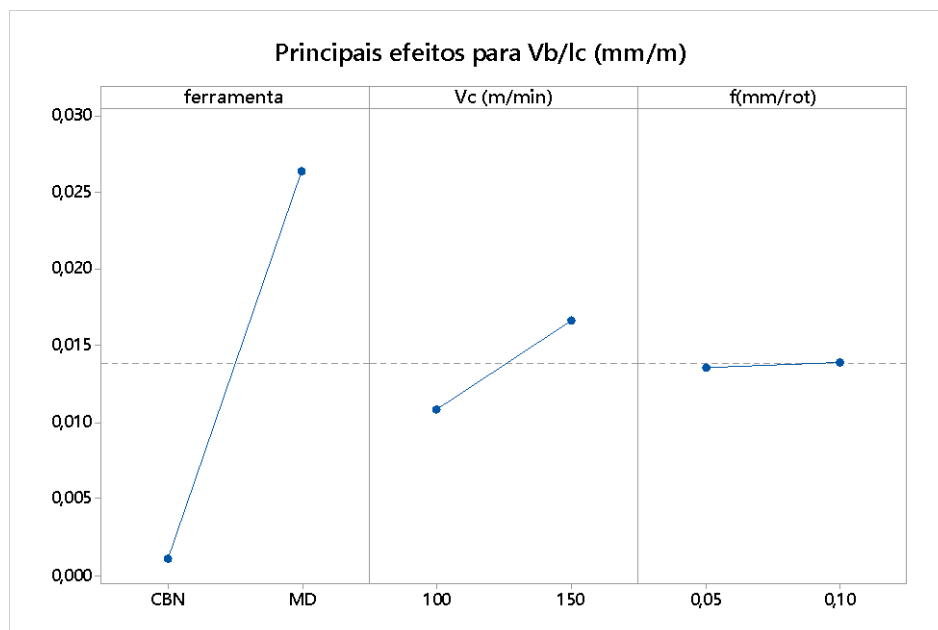
Quadro 10 – Análise de variância para a o desgaste de flanco relativo

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor-F	Valor-P
Modelo	7	0,002796	0,000399	540,13	0,000
Linear	3	0,002697	0,000899	1215,68	0,000
ferramenta	1	0,002560	0,002560	3462,04	0,000
Vc (m/min)	1	0,000136	0,000136	184,22	0,000
f(mm/rot)	1	0,000001	0,000001	0,78	0,402
Interações de 2ª ordem	3	0,000098	0,000033	44,07	0,000
ferramenta*Vc (m/min)	1	0,000096	0,000096	130,08	0,000
ferramenta*f(mm/rot)	1	0,000000	0,000000	0,58	0,467
Vc (m/min)*f(mm/rot)	1	0,000001	0,000001	1,55	0,249
Interações de 3ª ordem	1	0,000001	0,000001	1,67	0,233
ferramenta*Vc (m/min)*f(mm/rot)	1	0,000001	0,000001	1,67	0,233
Erro	8	0,000006	0,000001		
Total	15	0,002802			

Fonte: Elaborado pelo autor

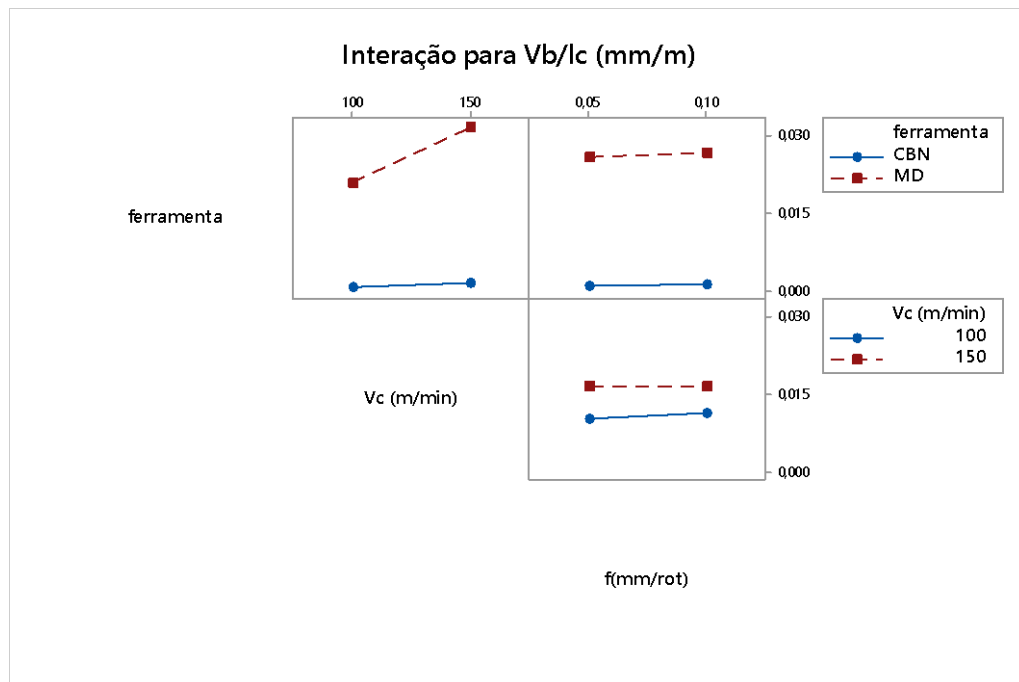
As influências dos fatores tipo de ferramenta, avanço e velocidade de corte sobre a média do desgaste de flanco relativo durante os processos de torneamento do aço AISI 52100, estão demonstradas na figura 54. Já a figura 55 apresenta as influências das interações de segunda ordem sobre o mesmo parâmetro de saída.

Figura 54 – Média do desgaste de flanco relativo nos ensaios realizados



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 55 – Influência das interações de segunda ordem sobre o desgaste de flanco relativo nos ensaios realizados



Fonte: Elaborado pelo autor

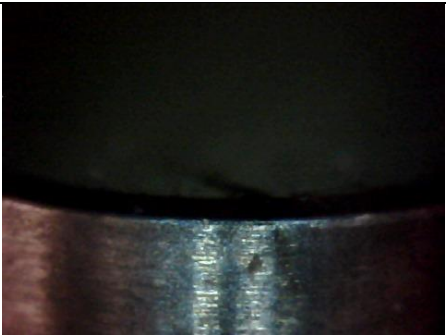
A figura 54 expressa, através de gráficos, a influência dos parâmetros de entrada no desgaste de flanco relativo. A ferramenta e a velocidade de corte possuem uma influência no parâmetro de saída analisado. Observa-se que o avanço não apresenta uma influência, o que pode ser explicado pelo fato de que o aumento do avanço causar um aumento de energia que por sua vez é compensado pelo aumento da área, ou seja, a energia tende a se distribuir. O tipo de ferramenta apresenta a maior influência sobre o desgaste de flanco relativo, fato esse comprovado pela inclinação da reta e pelo valor-F e justificado pela dureza superior apresentada pelo CBN, que tem, como consequência, um corte muito melhor, gerando desgastes menores. Já em relação a velocidade de corte quanto menor, há uma menor área de contato e um menor atrito durante a usinagem, sendo assim, é gerado um menor desgaste de flanco.

Já a figura 55 expressa, por meio de gráficos, a interação entre dois parâmetros de entrada. Quando as retas dos gráficos são concorrentes, ou seja, possuem um ponto em comum ou tendem a possuir um ponto em comum pode-se dizer que há uma interação significativa estaticamente. O gráfico ferramenta com velocidade de corte possui uma tendência a se cruzar na parte inferior, enquanto nos gráficos de ferramenta com avanço e velocidade de corte com avanço as linhas são praticamente paralelas entre si, indicando que não há uma interação significativa estaticamente.

Pela figura 53 pode-se observar que a combinação da ferramenta de CBN com velocidade de corte de 100 m/min e avanço de 0,05 mm/rot gerou o menor desgaste de flanco relativo. Enquanto, a combinação da ferramenta de metal duro com velocidade de 150 m/min e avanço de 0,05 mm/rot gerou a maior desgaste de flanco relativo.

No quadro 11 são apresentadas imagens do desgaste de flanco nas ferramentas utilizadas para cada ensaio.

Quadro 11 - Desgastes das ferramentas de corte ao final do processo (ampliação de 500x)

Condição de Usinagem	Aresta da ferramenta	
Ensaio 1 Ferramenta: CBN $V_c = 100 \text{ m/min}$ $f = 0,05 \text{ mm/rot}$		
Ensaio 2 Ferramenta: CBN $V_c = 100 \text{ m/min}$ $f = 0,1 \text{ mm/rot}$		
Ensaio 3 Ferramenta: CBN $V_c = 150 \text{ m/min}$ $f = 0,05 \text{ mm/rot}$		
Ensaio 4 Ferramenta: CBN $V_c = 150 \text{ m/min}$ $f = 0,1 \text{ mm/rot}$		

Ensaio 5 Ferramenta: Metal duro $V_c = 100 \text{ m/min}$ $f = 0,05 \text{ mm/rot}$	
Ensaio 6 Ferramenta: Metal duro $V_c = 100 \text{ m/min}$ $f = 0,1 \text{ mm/rot}$	
Ensaio 7 Ferramenta: Metal duro $V_c = 150 \text{ m/min}$ $f = 0,05 \text{ mm/rot}$	
Ensaio 8 Ferramenta: Metal duro $V_c = 150 \text{ m/min}$ $f = 0,1 \text{ mm/rot}$	

Fonte: Elaborado pelo autor

Mediante análise das imagens 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. Só foi observado desgaste de cratera na realização do ensaio 3.

Para os ensaios com a ferramenta de CBN (ensaios 1,2,3 e 4) o desgaste principal foi o desgaste de flanco, que é consequência do atrito entre a peça e a superfície de folga da

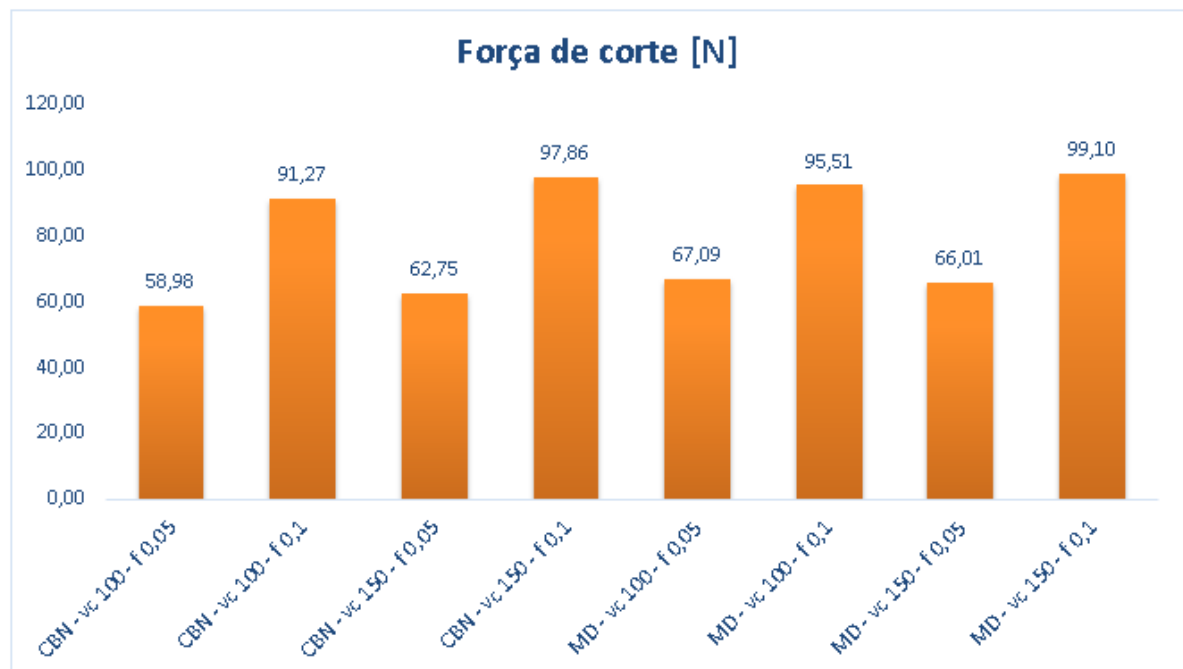
ferramenta. Esse tipo de desgaste está presente em qualquer processo de usinagem. De maneira geral o desgaste observado para as ferramentas foi bem pequeno e o único sinal de atenção foi para o desgaste de cratera do ensaio 3.

Para os ensaios com a ferramenta de metal duro (ensaio 5, 6, 7 e 8) o desgaste principal foi o desgaste de flanco, que é consequência do atrito entre a peça e a superfície de folga da ferramenta. Esse tipo de desgaste está presente em qualquer processo de usinagem. De maneira geral o desgaste observado para a ferramenta de metal duro foi maior do que o observado para as ferramentas de CBN.

5.7 EFEITOS PARA A FORÇA DE CORTE

O valor médio da força de corte medida após o ensaio de cada combinação de entrada está descrito na figura 56. É possível observar que a força de corte cresce com o aumento do avanço. E que tanto tipo da ferramenta, como velocidade de corte não impactam muito nesse parâmetro de saída.

Figura 56 - Média da força de corte para cada condição de entrada dos ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor

O quadro 12 mostra os valores obtidos pela análise de variância e das influências sobre a média da força de corte. Para esse parâmetro tem-se apenas o avanço influenciando de forma significativa estaticamente. O parâmetro linear significativos está em destaque no quadro 12.

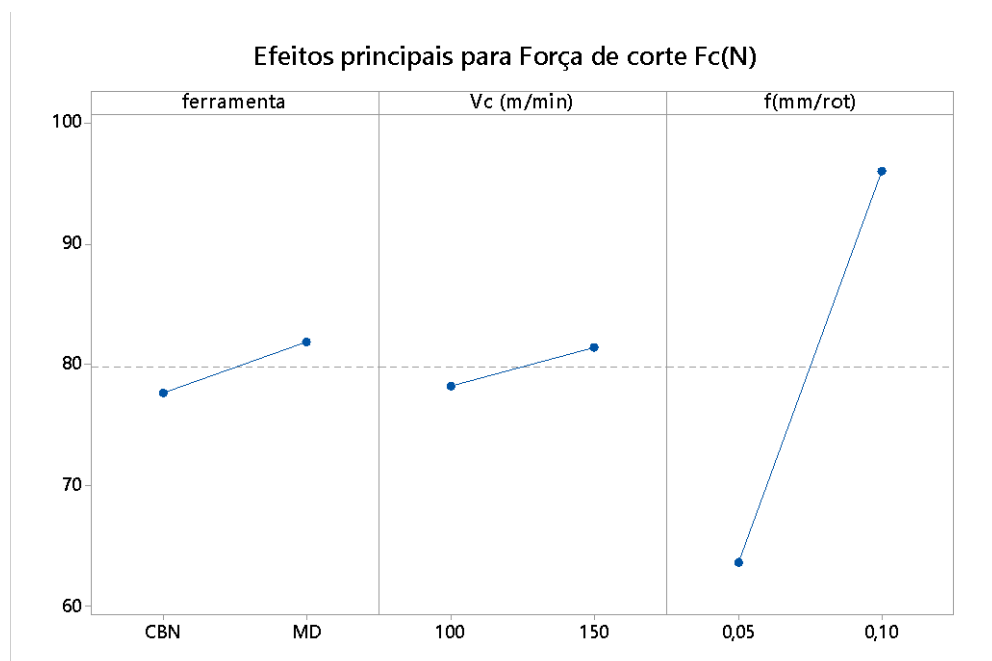
Quadro 12 – Análise de variância para a força de corte

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor-F	Valor-P
Modelo	7	4305,65	615,09	34,92	0,000
Linear	3	4266,77	1422,26	80,74	0,000
ferramenta	1	70,98	70,98	4,03	0,080
Vc (m/min)	1	41,34	41,34	2,35	0,164
f(mm/rot)	1	4154,45	4154,45	235,85	0,000
Interações de 2 ^a ordem	3	38,03	12,68	0,72	0,568
ferramenta*Vc (m/min)	1	15,37	15,37	0,87	0,378
ferramenta*f(mm/rot)	1	8,67	8,67	0,49	0,503
Vc (m/min)*f(mm/rot)	1	13,99	13,99	0,79	0,399
Interações de 3 ^a ordem	1	0,85	0,85	0,05	0,832
ferramenta*Vc (m/min)*f(mm/rot)	1	0,85	0,85	0,05	0,832
Erro	8	140,92	17,61		
Total	15	4446,57			

Fonte: Elaborado pelo autor

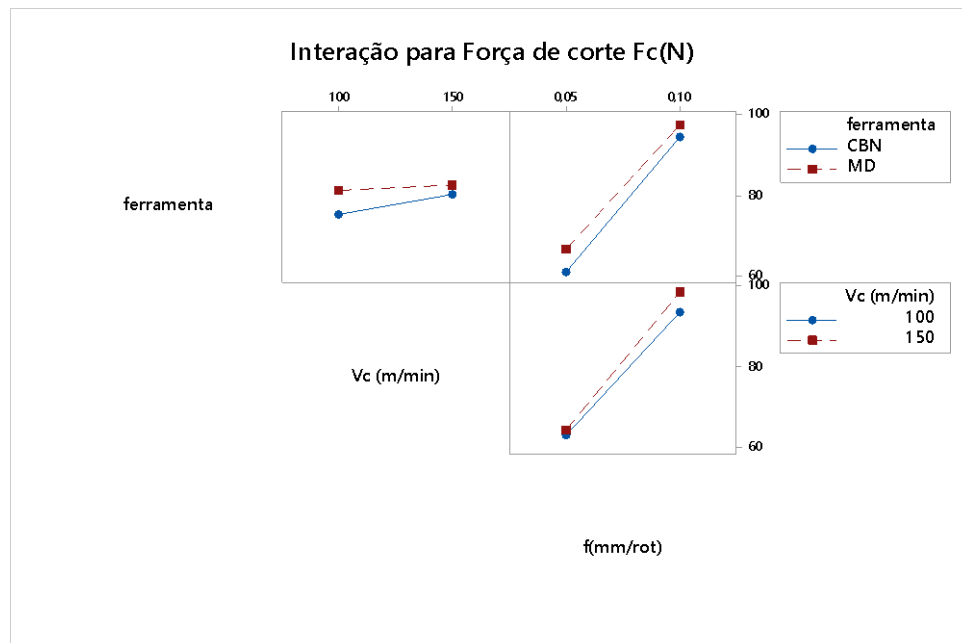
As influências dos fatores tipo de ferramenta, avanço e velocidade de corte sobre a média da força de corte durante os processos de torneamento do aço AISI 52100, estão demonstradas na figura 57. Já a figura 58 apresenta as influências das interações de segunda ordem sobre o mesmo parâmetro de saída.

Figura 57 – Média da força de corte nos ensaios realizados



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 58 – Influência das interações de segunda ordem sobre a força de corte nos ensaios realizados



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 57 expressa, através de gráficos, a influência dos parâmetros de entrada na força de corte. Lembrando que esse parâmetro não foi medido diretamente, mas sim calculado. O avanço foi o único fator com uma influência no parâmetro de saída analisado. Entretanto, ferramenta e a velocidade de corte possuem uma relevância na força de corte, uma vez que possuem valor-F superior a 2,0. A força de corte está relacionada com a área de corte, ou seja, quanto maior o avanço, maior a área de corte e, conseqüentemente, maior a força de corte observada. Em relação ao tipo de ferramenta, a de CBN apresenta uma dureza muito superior à de metal duro com revestimento, como consequência, tem-se um corte muito melhor, gerando forças de corte menores.

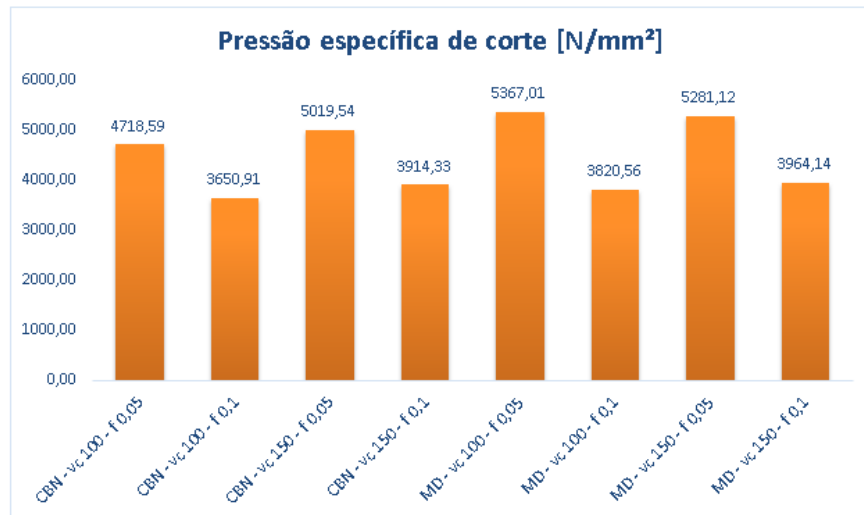
Pela figura 56 pode-se observar que a combinação da ferramenta de CBN com velocidade de corte de 100 m/min e avanço de 0,05 mm/rot gerou a menor força de corte. Enquanto, a combinação da ferramenta de metal duro com velocidade de 150 m/min e avanço de 0,1 mm/rot gerou a maior força de corte.

5.8 EFEITOS PARA A PRESSÃO ESPECÍFICA DE CORTE

O valor médio da pressão específica de corte medida após o ensaio de cada combinação de entrada está descrito na figura 59. É possível observar que a pressão específica de corte

diminui com o aumento do avanço. E que o tipo da ferramenta também impacta nesse parâmetro de saída.

Figura 59 - Média da pressão específica de corte para cada condição de entrada dos ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor

O quadro 13 mostra os valores obtidos pela análise de variância e das influências sobre a média da pressão específica de corte. Para esse parâmetro tem-se o tipo de ferramenta e o avanço influenciando de forma significativa estaticamente. Os parâmetros lineares significativos estão em destaque no quadro 13.

Quadro 13 – Análise de variância para a pressão específica de corte

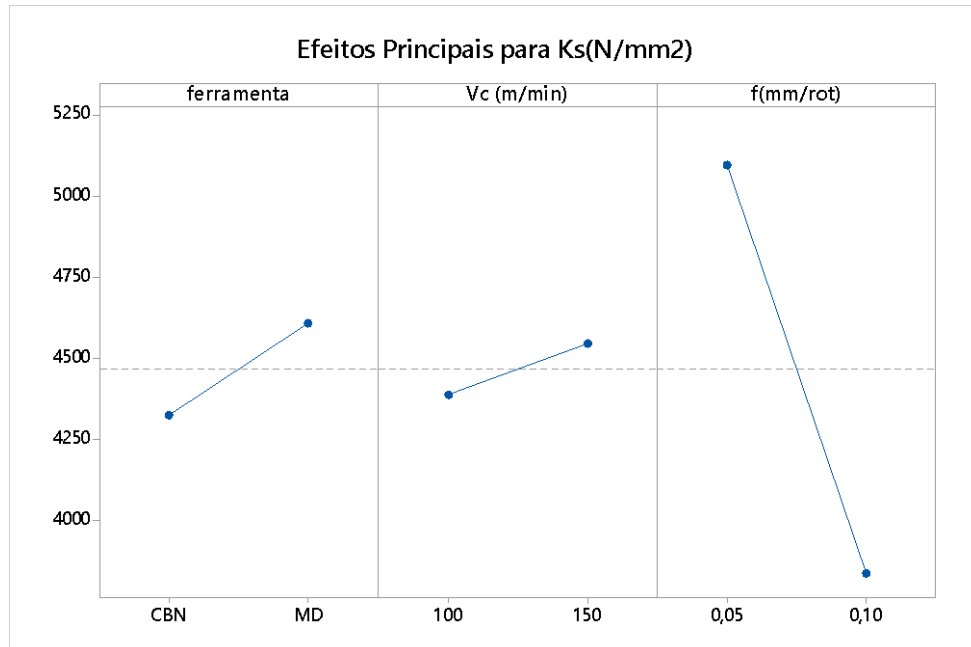
Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor-F	Valor-P
Modelo	7	6967252	995322	19,74	0,000
Linear	3	6756828	2252276	44,66	0,000
ferramenta	1	318923	318923	6,32	0,036
Vc (m/min)	1	96738	96738	1,92	0,203
f(mm/rot)	1	6341168	6341168	125,74	0,000
Interações de 2ª ordem	3	192602	64201	1,27	0,347
ferramenta*Vc (m/min)	1	64182	64182	1,27	0,292
ferramenta*f(mm/rot)	1	119210	119210	2,36	0,163
Vc (m/min)*f(mm/rot)	1	9210	9210	0,18	0,680
Interações de 3ª ordem	1	17822	17822	0,35	0,569
ferramenta*Vc (m/min)*f(mm/rot)	1	17822	17822	0,35	0,569
Erro	8	403445	50431		
Total	15	7370697			

Fonte: Elaborado pelo autor

As influências dos fatores tipo de ferramenta, avanço e velocidade de corte sobre a média da pressão específica de corte durante os processos de torneamento do aço AISI 52100, estão

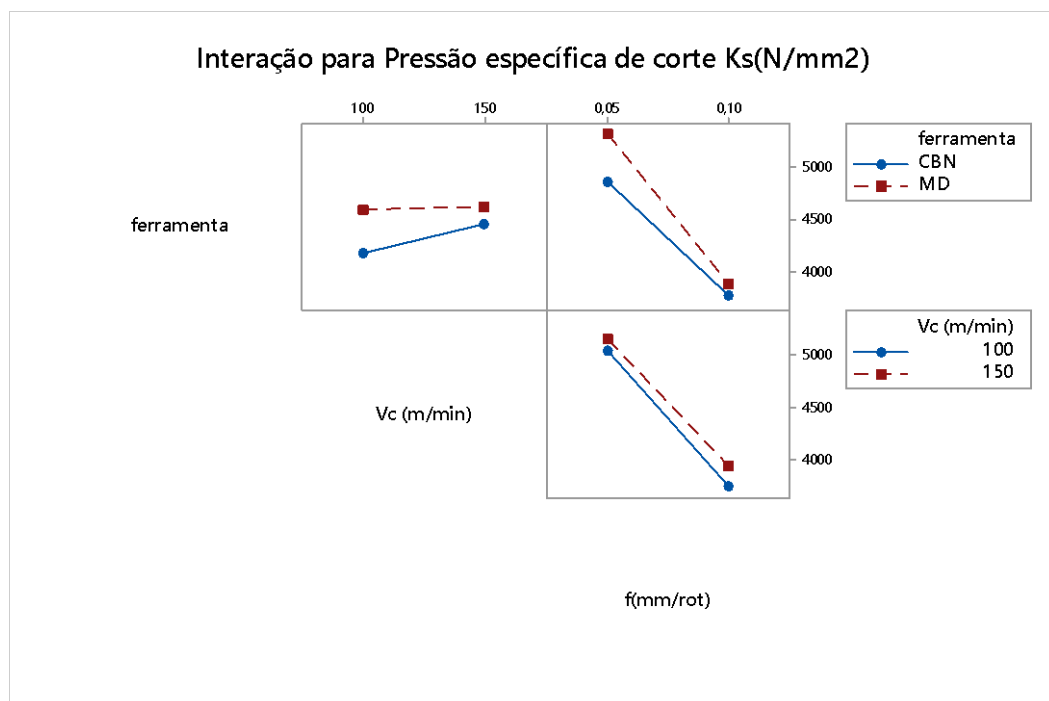
demonstradas na figura 60. Já a figura 61 apresenta as influências das interações de segunda ordem sobre o mesmo parâmetro de saída.

Figura 60 – Média da pressão específica de corte nos ensaios realizados



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 61 – Influência das interações de segunda ordem sobre a pressão específica de corte nos ensaios realizados



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 60 expressa, através de gráficos, a influência dos parâmetros de entrada na pressão específica de corte. Lembrando que esse parâmetro não foi medido diretamente, mas sim calculado. Para essa variável de saída temos o tipo de ferramenta e o avanço influenciando. O avanço apresenta a maior influência sobre a pressão específica de corte calculada, fato esse comprovado pela inclinação da reta e pelo valor-F. A pressão é inversamente proporcional a área, ou seja, com o aumento do avanço tem-se menores pressões de corte. Em relação ao tipo de ferramenta, a de CBN apresenta uma dureza muito superior à de metal duro com revestimento, como consequência, tem-se um corte muito melhor, gerando uma pressão específica de corte menor. Outro fator importante em relação a ferramenta, é que a de CBN apresenta uma menor força de corte.

Já a figura 61 expressa, por meio de gráficos, a interação entre dois parâmetros de entrada. Quando as retas dos gráficos são concorrentes, ou seja, possuem um ponto em comum ou tendem a possuir um ponto em comum pode-se dizer que há uma interação significativa estaticamente. O gráfico da ferramenta com avanço possui uma tendência a se cruzar na parte inferior, o que pode ser explicado por um valor-F superior a 2,0. O gráfico da ferramenta com velocidade de corte possui uma tendência a se cruzar na parte superior, o que pode ser explicado por um valor-F próximo a 2,0. Já o gráfico de velocidade de corte com avanço apresenta linhas praticamente paralelas entre si, indicando que não há uma interação significativa estaticamente.

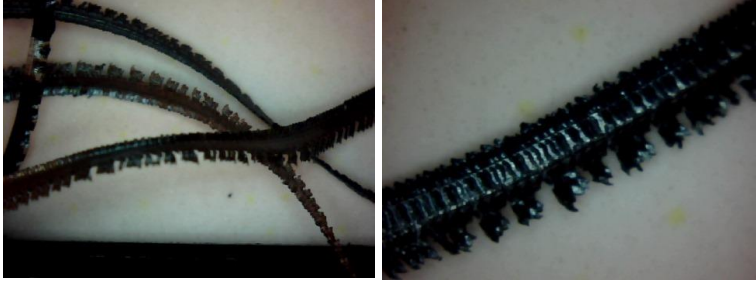
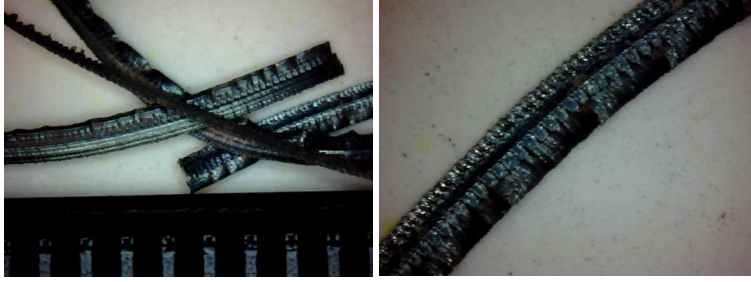
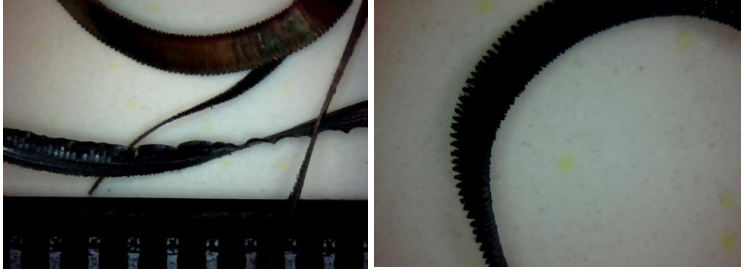
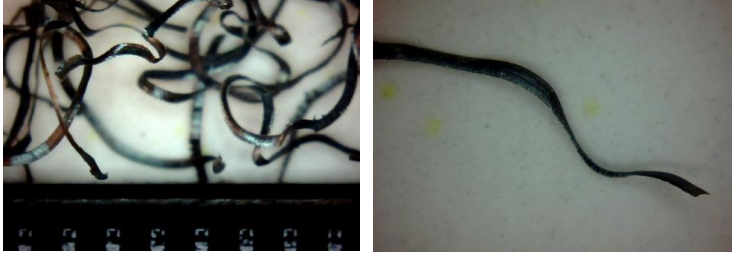
De acordo com Mitsubishi (2007), a pressão específica de corte do aço AISI 52100 a um avanço de 0,1mm/rot tem como referencial o valor de 4500 N/mm², sendo assim, foi possível constatar que os valores dos ensaios foram próximos do esperado.

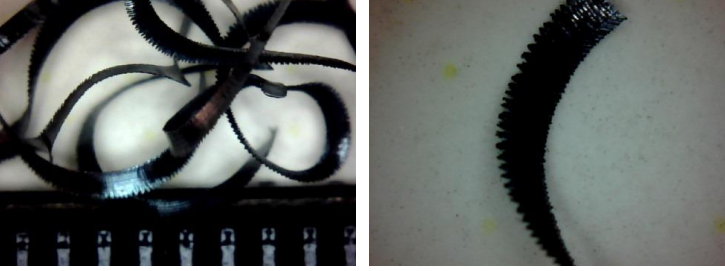
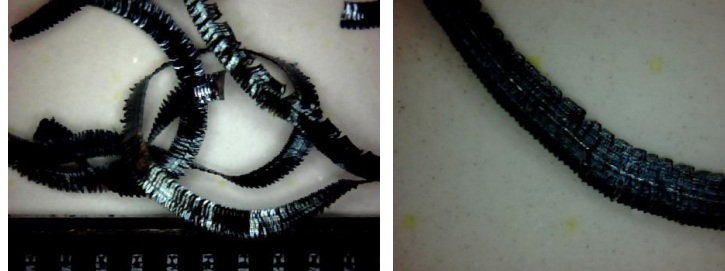
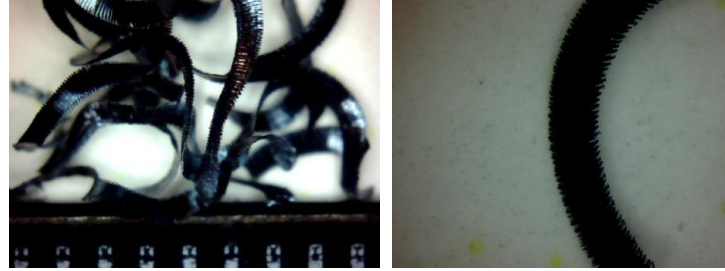
Pela figura 59 pode-se observar que a combinação da ferramenta de CBN com velocidade de corte de 100 m/min e avanço de 0,1 mm/rot gerou a menor pressão específica de corte. Enquanto, a combinação da ferramenta de metal duro com velocidade de 100 m/min e avanço de 0,05 mm/rot gerou a maior pressão específica de corte.

5.9 TIPOS E FORMAS DE CAVACO

Os cavacos gerados nos ensaios são todos do tipo cisalhado e curtos, com a formação de lamelas e aspecto serrilhado nas bordas. A classificação das formas de cavacos foi feita tomando como base a figura 7 e estão apresentadas no quadro 14, as imagens foram produzidas com ampliação de até 200x.

Quadro 14 – Imagens e classificação dos cavacos formados em cada ensaio

Condição de Usinagem e Classificação do Cavaco	Imagem do Cavaco	
Ensaio 1 Ferramenta: CBN $V_c = 100 \text{ m/min}$ $f = 0,05 \text{ mm/rot}$ Cavaco em fita longo		
Ensaio 2 Ferramenta: CBN $V_c = 100 \text{ m/min}$ $f = 0,1 \text{ mm/rot}$ Cavaco em fita longo		
Ensaio 3 Ferramenta: CBN $V_c = 150 \text{ m/min}$ $f = 0,05 \text{ mm/rot}$ Cavaco em fita longo		
Ensaio 4 Ferramenta: CBN $V_c = 1500 \text{ m/min}$ $f = 0,1 \text{ mm/rot}$ Cavaco em fita longo		
Ensaio 5 Ferramenta: Metal duro $V_c = 100 \text{ m/min}$ $f = 0,05 \text{ mm/rot}$ Cavaco em fita emaranhado		

Ensaio 6 Ferramenta: Metal duro $V_c = 100 \text{ m/min}$ $f = 0,1 \text{ mm/rot}$ Cavaco em fita emaranhado	
Ensaio 7 Ferramenta: Metal duro $V_c = 150 \text{ m/min}$ $f = 0,05 \text{ mm/rot}$ Cavaco em fita emaranhado	
Ensaio 8 Ferramenta: Metal duro $V_c = 150 \text{ m/min}$ $f = 0,1 \text{ mm/rot}$ Cavaco em fita emaranhado	

Fonte: Elaborado pelo autor

Pela análise visual pode-se observar que todos os cavacos apresentaram um tom azulado, o que é explicado pelas altas temperaturas atingida no processo, superior a 800°C . Esse fato era esperado uma vez que o aço AISI 52100 apresenta uma dureza elevada e as ferramentas utilizadas possuíam um ângulo de saída negativo. De modo geral, a ferramenta de CBN gerou cavacos menos azulados, ou seja, com menores temperaturas.

O cavaco de cisalhamento é originado em função das altas temperaturas atingidas durante o processo de usinagem e devido à velocidade de deformação. E apresenta como principais características as lamelas justaposta bem distintas e as bordas serrilhadas.

Como durante todo o trabalho a profundidade de corte foi mantida constante esse parâmetro não teve influência no tipo e formação dos cavacos. Outro fator importante foi que o aumento do avanço foi bem baixo quando comparada ao raio de ponta das ferramentas utilizadas.

De maneira geral, as lamelas ficaram mais perceptíveis com o aumento tanto da velocidade de corte quanto 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.

De acordo com a literatura, os cavacos em fitas apresentam alguns problemas com relação ao espaço ocupado ser um pouco maior, sendo difíceis de serem transportados e podendo provocar acidentes. Além disso, quando comparado com cavaco helicoidal, tem uma maior interferência 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 mostrados ao longo deste trabalho, foi possível concluir que:

- A ferramenta de CBN foi a que obteve os melhores resultados, com menores níveis de desgaste da ferramenta, menor rugosidade da peça usinada, menor consumo de potência do motor, menor nível de emissão acústica e menores vibrações;
- Ambas as ferramentas estudadas apresentaram resultados de rugosidade dentro da faixa de retificação, ou seja, não seria necessário o processo de retificação da peça após a usinagem. Esse fato justificaria o uso de ambas as ferramentas nas condições demonstradas;
- O consumo de potência aumentou com o aumento do avanço e da velocidade de corte, e foi pouco influenciado pelo tipo da ferramenta;
- A ferramenta de CBN apresentou menores valores de vibração, emissão acústica e desgaste de flanco quando comparada a ferramenta de metal duro;
- O melhor acabamento da peça usinada e maior durabilidade da ferramenta, podem ser obtidos com avanço de 0,05mm/rot em ambas as ferramentas;
- A velocidade de corte de 100 m/min foi a mais vantajosa em todos os parâmetros de saída analisados, exceto na rugosidade média e total, nas quais a velocidade de 150m/min provocou um melhor acabamento superficial.
- Os cavacos gerados foram todos de cisalhamento e do tipo fita, com comprimento longo, o que pode ser prejudicial na usinagem.

Portanto, baseado nas informações e nos resultados obtidas neste trabalho, pode-se concluir que a ferramenta de nitreto cúbico de boro (CBN) possibilitou um melhor desempenho e melhor acabamento superficial no processo de torneamento do aço AISI 52100 temperado e revenido.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como forma de se aprofundar no assunto e complementar esse trabalho apresentado, sugere-se para pesquisas futuras:

O estudo mais detalhado do desgaste em todas as superfícies das ferramentas de corte (como por exemplo, os desgastes de cratera, o qual não foi avaliado neste trabalho);

Com um dinamômetro adequado, seria possível medir a força de corte de forma direta. Dessa maneira, seria possível comparar os valores obtidos tanto de forma calculada, como de forma direta;

Para um melhor entendimento da influência dos recobrimentos no processo de usinagem, seria interessante expandir o uso para diversas ferramentas de metal duro com revestimentos diferentes;

E por último, para compreender melhor o comportamento do aço AISI 52100, poderia ser executada uma análise metalográfica do material, detalhando ainda mais os resultados e análises obtidas neste trabalho.

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: 01 nov. 2021.
- ASM INTERNATIONAL. **ASM metal handbook**. Ohio: ASM International, 1985.
- BHUIYAN, M. S. H.; CHOUDHURY, I. A.; DAHARI, M. **Monitoring the tool wear, surface roughness and chip formation occurrences using multiple sensors in turning**. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 33, n. 4, p. 476–487, 2014. The Society of Manufacturing Engineers. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.04.005>. Acesso em: 17 nov. 2021.
- CALLISTER JÚNIOR, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- 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: 01 nov. 2021.
- 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: 28 nov. 2021.
- DAGNALL, H. **Exploring Surface Texture**. 2nd edition, Rank Taylor Hobson Limited, England, 1986.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Avárias e desgastes da ferramenta**. 8. ed. São Paulo: Artilber, 2013.
- FERRARESI, D. **Usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.
- 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: 06 nov. 2021.
- 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. 2021.

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: 17 nov. 2021.

HEATH, P.J. **Properties and Uses of Amborite**, Industrial Diamond Review, Nº 3, pp. 120-127, 1986.

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

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

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: 06 nov. 2021.

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: 17 nov. 2021.

LAURO, C. H.; BRANDÃO, L. C.; BALDO, D.; REIS, R. A.; DAVIM, J. P. **Monitoring and processing signal applied in machining processes** - A review. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, v. 58, p. 73–86, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2014.08.035>. Acesso em: 18 nov. 2021.

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

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: 02 nov. 2021.

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: 02 nov. 2021.

NOGUEIRA, M. A. S. **Efeito da microestrutura prévia e da microsegregação na formação da austenita, nas temperaturas Ms e nas transformações isotérmicas do aço AISI 52100**. 1986. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

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: 03 nov. 2021.

SANDVIK. **Catálogo de produtos para usinagem: ferramentas para torneamento**. Sandvick Coromant. 2020. Disponível em: <https://coromantstrgprod.blob.core.windows.net/publications/a66c1bd2-52c4-47e6-8024-6d99a70f3d22.pdf?sv=2020-04-08&st=2022-01-26T12%3A58%3A50Z&se=2022-01-26T15%3A03%3A50Z&sr=b&sp=r&rsct=inline%3B+filename%3Dc-2900-26.pdf&rsct=application%2Fpdf&sig=6SKVjF8EtNaEs34Ku6Usiwd8BjNnShn0QBK59%2Bqmi4I%3D>. Acesso em: 15 set. 2021.

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 set. 2021.

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: 04 nov. 2021.

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: 12 nov. 2021.

SOUZA, A. J. DE. **Aplicação de multisensores no prognóstico da vida de ferramenta de corte no torneamento**, 2004. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/88055>. Acesso em: 17 nov. 2021.

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: 06 nov. 2021.

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.

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: 03 nov. 2021.

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_1wwnttcUVNlKR1lN9A_840. Acesso em: 01 nov. 2021.

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: 15 nov. 2021.

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: 17 nov. 2021.