

VIVIAN MARTINS FERREIRA DA SILVA

**Análise do torneamento do aço AISI 4340 endurecido com ferramentas de metal duro
recobertas com TiAlN-TiN**

Vivian Martins Ferreira da Silva

**Análise do torneamento do aço AISI 4340 endurecido com ferramentas de metal duro
recobertas com TiAlN+TiN**

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

Orientador (a): Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

S586a	Silva, Vivian Martins Ferreira da Análise do torneamento do aço AISI 4340 endurecido com ferramentas de metal duro recobertas com TiAlN+TiN / Vivian Martins Ferreira da Silva – Guaratinguetá, 2021. 90 f. : il. Bibliografia : f. 86-90 Trabalho de graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021. Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves 1. Aço de alta resistência. 2. Ferramentas de corte. 3. Usinagem. I. Título. CDU 621.9
-------	---

Luciana Máximo

Bibliotecária-CRB-8/3595

VIVIAN MARTINS FERREIRA DA SILVA

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

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



Prof. Dr. JOSÉ VITOR CANDIDO DE SOUZA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves
Orientador/UNESP-FEG



Eng. Emanuele Schineider Callissaya
UNESP-FEG



Eng. Melina Teixeira Tomazela Pressuto
Membro Externo

DADOS CURRICULARES

VIVIAN MARTINS FERREIRA DA SILVA

NASCIMENTO	20.12.1992 – São Paulo / SP
FILIAÇÃO	Valdenor Ferreira da Silva Eliana Martins
2014/2020	Graduação em Engenharia de Materiais – Bacharelado Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

dedico este trabalho
de modo especial, à minha família

AGRADECIMENTOS

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

aos meus pais, *Eliana Martins e Valdenor Ferreira da Silva*, que sempre incentivaram meus estudos e me apoiaram nas minhas escolhas profissionais e pessoais;

ao meu orientador, *Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves*, pelo incentivo, em especial no atual cenário de pandemia;

aos funcionários e técnicos da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pelo auxílio no desenvolvimento dos projetos.

“Só sabemos com exatidão quando sabemos pouco; à medida que vamos adquirindo conhecimento, instala-se a dúvida”

Goethe

RESUMO

Este estudo visa avaliar o processo de torneamento do aço AISI 4340 endurecido, com ferramenta de corte de metal duro revestida com TiAlN e TiN, em substituição à etapa de retificação. Eliminar a retificação traz melhorias no processo, tais como diminuição de custo e de complexidade, além da remoção de fluídos de corte, o que possibilita a usinagem a seco e, com isso, torna o processo menos agressivo tanto para o meio ambiente quanto para o operador da máquina. Em contrapartida, também existem desvantagens no torneamento duro, dentre elas o maior desgaste da ferramenta de corte, daí a importância em selecionar materiais apropriados para cumprir essa função. Atualmente, são utilizadas ferramentas de PCBN para a usinagem de aços endurecidos, porém a mesma custa até oitenta vezes mais do que ferramentas de metal duro. Neste trabalho, será avaliada a ferramenta de corte de metal duro revestida, contemplando propriedades extremamente atrativas e antagônicas entre si, como por exemplo a resistência ao desgaste das camadas externas, enquanto o seu núcleo possui elevada tenacidade. Para analisar o processo, foi feito o acompanhamento do comportamento das variáveis de saída do mesmo, ao longo dos ensaios, tais como rugosidade, emissão acústica, potência consumida, vibração, além de observações microscópicas qualitativas e quantitativas dos desgastes da ferramenta de corte e também estudos dos cavacos formados. Foi realizado um planejamento de experimentos fatorial completo variando-se os parâmetros de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte de forma que fosse possível entender a interferência de cada fator individualmente e suas interações, através de análises estatísticas. De modo geral, o avanço mostrou-se o parâmetro mais significativo nas respostas das variáveis de saída do processo. O resultado final em termos de qualidade superficial da peça usinada ficou dentro da faixa de rugosidade adequada ao processo de retificação. Os cavacos formados foram contínuos, em sua maioria, o que pode interferir em variáveis como emissão acústica, mas não foi o suficiente para que o material retirado enroscasse na máquina e na peça, portanto a rugosidade da peça usinada não foi comprometida.

PALAVRAS-CHAVE: Aço AISI 4340. Torneamento duro. Ferramenta de metal duro revestida. TiAlN. TiN.

ABSTRACT

This study evaluate the turning process of hardened AISI 4340 steel, with a carbide cutting tool coated with TiAlN and TiN, replacing the grinding step. Eliminating grinding brings improvements in the process such as cost and complexity reduction, in addition to the removal of cutting fluids, which enables dry machining, making the process less aggressive for both the environment and the machine operator. On the other hand, there are also disadvantages in hard turning, including the increased wear of the cutting tool, hence the importance of selecting appropriate materials to fulfill this function. Currently, PCBN tools are used for machining hardened steel, but it costs up to eighty times more than carbide tools. In the case of the present work, the coated carbide cutting tool will be evaluated, considering extremely attractive and antagonistic properties, such as the wear resistance of the outer layers, while its core has high toughness. To validate the process, the behavior of important output variables was monitored throughout the tests, such as roughness, acoustic emission, consumed power, vibration, in addition to qualitative and quantitative microscopic observations of the cutting tool wear and also studies of the formed chips. A full factorial design was carried out by varying the cutting speed, advance and depth of cut parameters so that it was possible to understand the interference of each factor individually and their interactions, through statistical analysis. In general, the advance was shown to be the most significant parameter in the responses of the process output variables. The final result was satisfactory in terms of the surface quality of the machined part, as well as in the life of the tool when subjected to softer cutting parameters. The chips formed were mostly continuous, which can interfere with variables such as acoustic emission, but it was not enough for the material removed to curl on the machine and the part, so the roughness of the machined part was not compromised.

KEYWORDS: AISI 4340 steel. Hard turning. Coated carbide tool. TiAlN. TiN.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
APC	Aresta Postiça de Corte
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CVD	Chemical Vapour Deposition
EA	Emissão Acústica
HRC	Hardness Rockwell C (dureza Rockwell C)
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Brasileira Registrada
PVD	Physical Vapour Deposition
SAE	Society of Automotive Engineers

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
a _p	Profundidade de corte
C	Carbono
CBN	Nitreto de Boro Cúbico
Co	Cobalto
Cr	Cromo
D	Diâmetro
f	Avanço em mm/rot
F _c	Força de corte
Fe	Ferro
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
n	Rotação em rpm (η)
Ni	Níquel
P	Fósforo
PCBN	Nitreto cúbico de boro policristalino
Si	Silício
Ra	Rugosidade média
rpm	Rotações por minuto
R _t	Rugosidade total
S	Enxofre
Si	Silício
TiAlN	Nitreto de titânio-alumínio
TiN	Nitreto de titânio
V _{bmáx}	Desgaste de flanco máximo
V _c	Velocidade de corte
V _f	Velocidade de avanço
W	Watt

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO PRINCIPAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	AÇO AISI 4340	16
3.2	PROCESSO DE TORNEAMENTO.....	17
3.2.1	Parâmetros de corte no torneamento.....	19
3.2.1.1	Influência dos parâmetros de corte	21
3.2.2	Torneamento de aços endurecidos	22
3.3	USINAGEM A SECO.....	23
3.4	MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE.....	24
3.4.1	Metal duro.....	26
3.4.2	Metal duro revestido	27
3.4.2.1	TiN + TiAlN.....	29
3.5	DESGASTES DAS FERRAMENTAS DE CORTE	31
3.6	FORMAÇÃO DE CAVACO	36
3.7	VARIÁVEIS DE SAÍDA.....	39
3.7.1	Rugosidade	40
3.7.1.1	Rugosidade média.....	41
3.7.1.2	Rugosidade total	43
3.7.2	Potência de usinagem	43
3.7.3	Emissão acústica (EA).....	45
3.7.4	Vibração.....	46
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	47
4.1	CORPO DE PROVA.....	47
4.2	FERRAMENTA DE CORTE.....	47
4.3	PROCESSO DE TORNEAMENTO.....	48
4.4	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	50
4.4.1	Potência consumida	51
4.4.2	Vibração.....	53

4.4.3	Emissão acústica.....	53
4.5	RUGOSIDADE	54
4.6	DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE CORTE.....	55
4.7	TIPOS DE CAVACO	56
4.8	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	56
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
5.1	RUGOSIDADE MÉDIA (Ra)	57
5.2	RUGOSIDADE TOTAL (Rt)	61
5.3	POTÊNCIA CONSUMIDA.....	64
5.4	VIBRAÇÃO	68
5.5	EMIÇÃO ACÚSTICA	71
5.6	DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE.....	74
5.7	CAVACOS	79
6.	CONCLUSÃO.....	82
	REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

A usinagem consiste em um processo de fabricação que retira o material na forma de cavaco da peça ou componente, através da ação da ferramenta de corte, definindo o formato final da peça. É o método de fabricação mais utilizado na indústria metal mecânica, devido à elevada qualidade superficial, geométrica e dimensional dos produtos finais desse processo.

O torneamento é um tipo de processo dentro da usinagem, o qual é amplamente utilizado na indústria e, portanto, é alvo de inúmeros estudos. Um grande desafio das indústrias de usinagem é manter boas propriedades finais de acabamento e qualidade do processo, atrelados a baixos custos, o que vem levando a diversos estudos para otimização desses fatores. Com a finalidade de agrupar essas melhorias, a usinagem de aços endurecidos vem sendo foco do setor industrial, pois diminui o tempo de fabricação e seu custo com a eliminação do processo de retificação.

Aliado a isso, o aço AISI 4340 possui ótimas propriedades de sollicitação mecânica de esforços dinâmicos, além de elevada resistência à fadiga, forjabilidade, temperabilidade e tenacidade, fatores que impulsionam sua aplicação no setor automobilístico e aeronáutico. Por se tratar de usinagem de um aço endurecido, são necessários alguns cuidados especiais na escolha da ferramenta de corte, a qual deve possuir elevada resistência ao desgaste e dureza.

Segundo Machado et al. (2011), o PCBN (nitreto cúbico de boro policristalino) é considerado um material apropriado para a usinagem de aços endurecidos, porém seu fator limitante é o elevado custo (em torno de 80 vezes mais caro do que uma pastilha de metal duro), o que impulsiona o investimento em pesquisas de outras formulações interessantes para a ferramenta de corte, a qual também pode ser modificada por revestimentos. Esses estudos visam otimizar propriedades como tenacidade, dureza a quente e resistência ao desgaste das ferramentas.

As ferramentas de metal duro se tornam atrativas devido ao seu menor custo e propriedades como: elevada resistência ao desgaste e à compressão, alta densidade e dureza, tenacidade e boas propriedades mecânicas e térmicas a altas temperaturas. Além de suas propriedades, essas ferramentas possibilitaram o aumento de uma ordem de grandeza na velocidade de corte, se comparadas aos aços rápidos, permitindo um grande salto tecnológico no processo de usinagem. Aliado a esse fato, o desenvolvimento de processos de revestimento dessas ferramentas vem possibilitando expressivo aumento de produtividade, uma vez que diminui o desgaste das ferramentas utilizadas (KLOCKE; KÖNIG, 2008).

Ainda visando melhorias no processo de usinagem, o presente trabalho avalia a aplicação da usinagem a seco no torneamento, buscando um processo mais limpo, seguro e econômico do que a usinagem realizada com lubrificação convencional. Um ponto de atenção da usinagem a seco é o aquecimento excessivo da peça e da ferramenta, ocasionado pela elevada energia necessária para que o material seja removido (GINTING; NOUARI, 2007). Tal aquecimento pode comprometer a qualidade do produto final, bem como a vida útil da ferramenta. Um dos principais desafios atualmente é tornar essa técnica efetiva e vantajosa para a produtividade industrial, sem que haja alterações significativas das variáveis de saída do processo.

Diante do exposto, o presente trabalho visa estabelecer condições de usinagem que representem melhorias para esse processo, viabilizando o torneamento do aço AISI 4340 endurecido, através da usinagem a seco, e avaliando o desempenho da ferramenta de metal duro com revestimento de TiAlN+TiN por meio de análise das variáveis de saída do processo. Esses resultados validarão a eliminação da etapa de retificação por meio das condições já citadas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Avaliar a usinagem do aço 4340 no processo de torneamento através de ferramentas de metal duro com revestimento de TiAlN+TiN, como substituição ao processo de retificação.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analisar a rugosidade, potência de usinagem, vibração, emissão acústica, desgaste das ferramentas e tipos e formação de cavacos usando ferramentas de metal duro com revestimento de TiAlN+TiN.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AÇO AISI 4340

O aço AISI/SAE 4340, material escolhido para o presente estudo, é utilizado como um aço de alta resistência há cerca de 65 anos (SEVALE, 2014). Esse material possui aplicações estruturais críticas, devido às suas propriedades de elevada resistência à fadiga, alta tenacidade e alta resistência mecânica se submetido a tratamentos térmicos. Suas combinações de elevado endurecimento e alta ductilidade, bem como elevada resistência e razoável tenacidade são um dos fatores que favorecem sua aplicabilidade em partes estruturais (SEVALE, 2014).

Alguns exemplos de aplicações do aço AISI 4340, são: fabricação de tratores e veículos em geral, virabrequins para aviões, trens de pouso para aeronaves, pilões, rotores integrados para turbinas a vapor, eixos para turbinas e para calandras, engrenagens e geradores hidráulicos (ALVES; BIANCHI; AGUIAR, 2011).

A microestrutura do aço AISI 4340 é formada por um médio teor de carbono e vários elementos de liga que proporcionam maior temperabilidade ao material, embora estejam presentes em menores proporções (CHIAVERINI, 1986). A presença de níquel, cromo e molibdênio no aço AISI 4340 é o que melhora a sua capacidade de ser tratado termicamente, promovendo uma boa combinação de resistência-ductilidade (SEVALE, 2014). Na Tabela 1, é mostrada a composição química do aço AISI 4340:

Tabela 1 - Composição Química (% massa) do aço AISI/SAE 4340

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

Fonte: Adaptado da ABNT NBR NM 87:1996.

Como mencionado, o aço AISI 4340 é tratável termicamente e possui alta resistência mecânica e à fadiga em elevadas temperaturas, sendo caracterizado como baixa liga (BHATTACHARYA et al., 2011). As propriedades mecânicas obtidas pelos tratamentos térmicos aos quais é submetido se dão através da transformação de fase que ocorre em sua microestrutura.

É de conhecimento que existem diversos constituintes do aço, dentre eles a ferrita, austenita, bainita, perlita e martensita. A microestrutura resultante da transformação de fase pode ser formada por um único constituinte do aço, ou então pela combinação de mais de uma

fase, podendo variar de acordo com o tratamento térmico empregado, o que proporciona as mais diversas características ao material. Na Tabela 2, pode-se observar algumas propriedades do aço AISI 4340 temperado e submetido a diferentes temperaturas de revenimento.

Tabela 2 – Propriedades do aço AISI 4340 a diferentes temperaturas de revenimento.

Temperatura de revenimento	Resistência a tração (Mpa)	Tensão de escoamento (Mpa)	Alongamento em 50mm (%)	Redução de área (%)	Dureza HB	Dureza HRC
205	1980	1860	11	39	520	53
315	1760	1620	12	44	490	50
425	1500	1365	14	48	440	46
540	1240	1160	17	53	360	39
650	1020	860	20	60	290	31
705	860	740	23	63	250	24

Fonte: Abdalla et al. (2008).

O processo de revenimento é realizado após a têmpera, a uma temperatura mais baixa, a fim de aliviar as tensões internas formadas durante a temperagem. Esse alívio de tensões ocorre devido à modificação estrutural do material revenido, o que reduz sua dureza e resistência à tração e aumenta sua ductilidade.

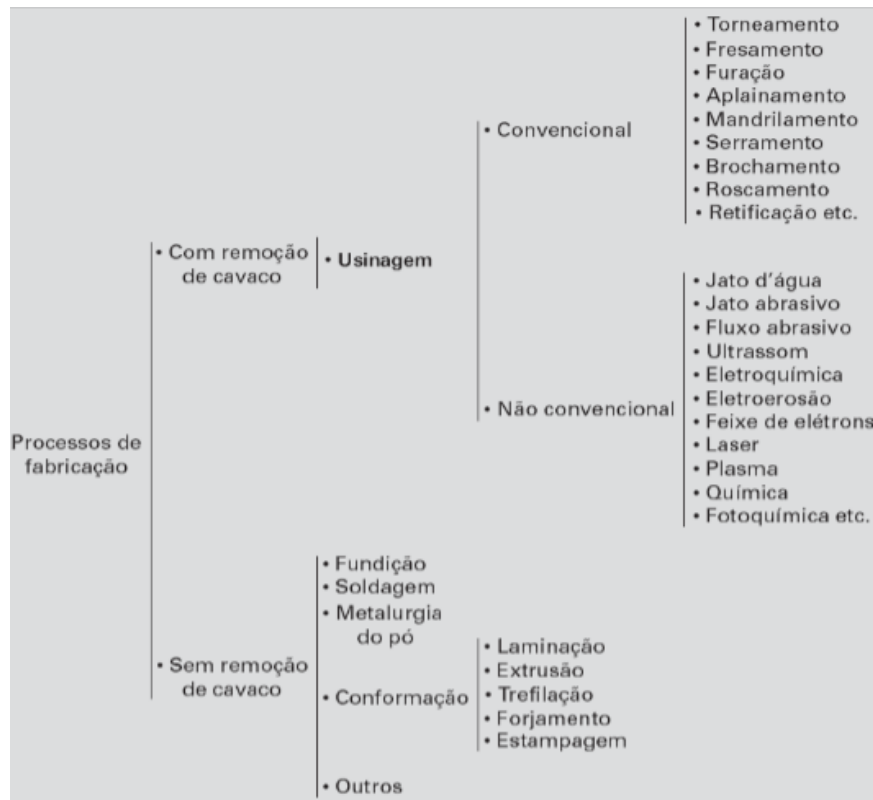
3.2 PROCESSO DE TORNEAMENTO

Os processos de usinagem diferem de outros tipos de processos de fabricação metal-mecânica, principalmente, devido à formação de resíduos. Eles caracterizam-se pela remoção do material da matéria prima em forma de cavaco e, dessa forma, serão atingidas a dimensão e forma desejadas para o produto final (KLOCKE; KÖNIG, 2008).

A remoção que ocorre na usinagem pode ser dividida entre desbaste e acabamento, sendo esse último responsável por atribuir uma melhor qualidade de finalização do produto (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2013). Um fator negativo da etapa de acabamento é o seu elevado custo.

A Figura 1 representa uma das possíveis classificações dos processos de fabricação metal-mecânica que existem atualmente:

Figura 1 - Classificações de processos de fabricação metal-mecânica



Fonte: Machado et al. (2011).

O torneamento é um processo de usinagem que consiste em usinar peças de revolução, em que a peça a ser usinada faz um movimento de rotação em torno do eixo principal da máquina, enquanto a ferramenta de corte desloca-se em relação ao eixo da peça. Esse deslocamento da ferramenta de corte pode ser longitudinal ou transversal, formando uma trajetória coplanar (FREITAS, 2017).

Existem alguns tipos de classificações dentro dos processos de torneamento, como por exemplo a classificação de acordo com a sua finalidade e de acordo com a sua trajetória (FERRARESI, 1977).

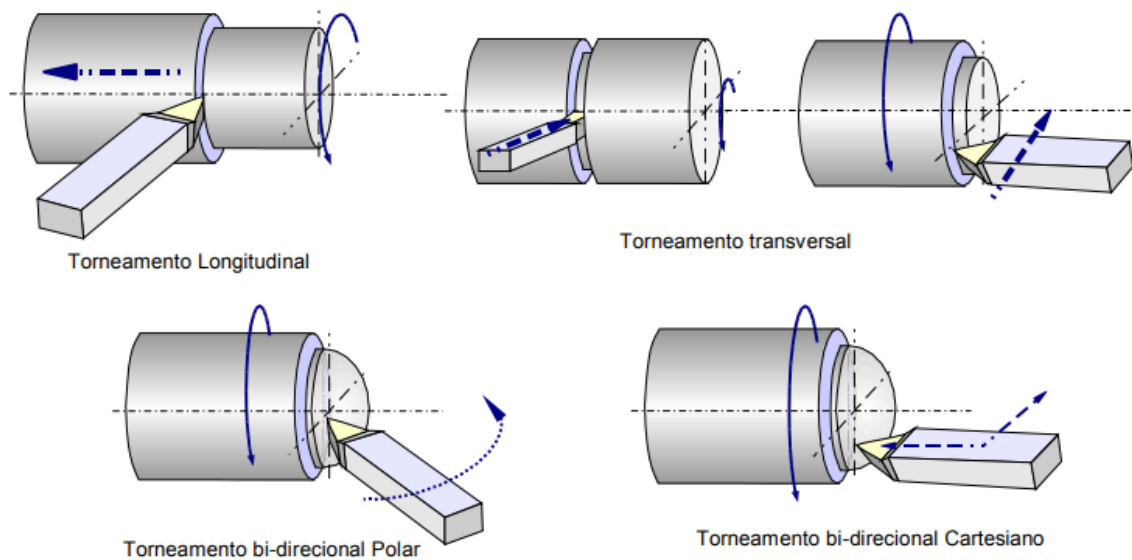
Dentro da sua classificação por finalidade, os processos de torneamento podem ser divididos em torneamento de desbaste e torneamento de acabamento. Como o próprio nome sugere, o torneamento de acabamento é uma operação de usinagem que visa a obtenção de um acabamento superficial especificado; já o desbaste é uma operação de usinagem que antecede ao acabamento (FERRARESI, 1977).

Quanto à trajetória, o torneamento pode ser classificado mais amplamente em retilíneo e curvilíneo. Como sugerido pelos próprios nomes, o torneamento retilíneo é um processo no

qual a ferramenta se desloca em uma trajetória retilínea, já no torneamento curvilíneo a ferramenta segue uma trajetória curvilínea (FERRARESI, 1977).

A máquina-ferramenta do torneamento é denominada torno. Um exemplo de torno é o torno mecânico, o qual é extremamente versátil devido à grande variedade em sua cinemática de processo, conforme mostrado na Figura 2. Alguns exemplos de tornos mecânicos, são: automáticos, CNC (Comando Numérico Computadorizado) e multiuso.

Figura 2 - Cinemáticas do processo de torneamento



Fonte: Stoeterau (2007).

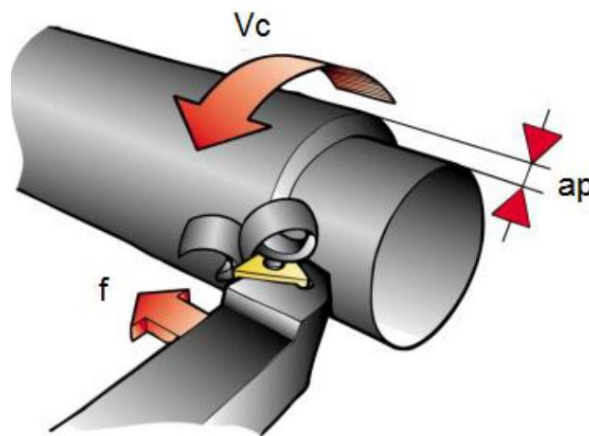
Diante de tamanha variedade nos processos de torneamento, existem grandezas físicas inerentes ao torneamento que, se combinadas adequadamente, garantem um melhor desempenho da usinagem da peça, de acordo com suas ferramentas e vislumbrando o resultado final desejado (FREITAS, 2017). Esses parâmetros geralmente são definidos de acordo com a percepção e experiência do operador do torno.

3.2.1 Parâmetros de corte no torneamento

A norma NBR 6162 – Movimentos e Relações Geométricas na Usinagem dos Metais: Terminologia, da ABNT, define as grandezas físicas do processo de usinagem para possibilitar o estudo desse processo com base na análise dos movimentos relativos que ocorrem no mesmo.

O movimento relativo entre a peça usinada e a ferramenta, que é o princípio do processo de usinagem, é determinado por parâmetros de grande importância e que devem ser monitorados em todo o processo, dentre eles o movimento de avanço, movimento de corte, velocidade de avanço (V_f), velocidade de corte (V_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p). Alguns destes parâmetros são representados na Figura 3:

Figura 3 – Principais parâmetros de corte no torneamento



Fonte: Adaptado de Kennametal (2014).

Segundo Machado et al. (2011), os movimentos que ocorrem durante o processo de torneamento são relativos entre a aresta da ferramenta de corte e a peça. Para tanto, a peça é considerada estacionária. De acordo com o mesmo autor, os movimentos podem ser classificados como movimento de corte, movimento de avanço e movimento efetivo de corte. Esses movimentos originam cavacos diretamente (FERRARESI, 1977).

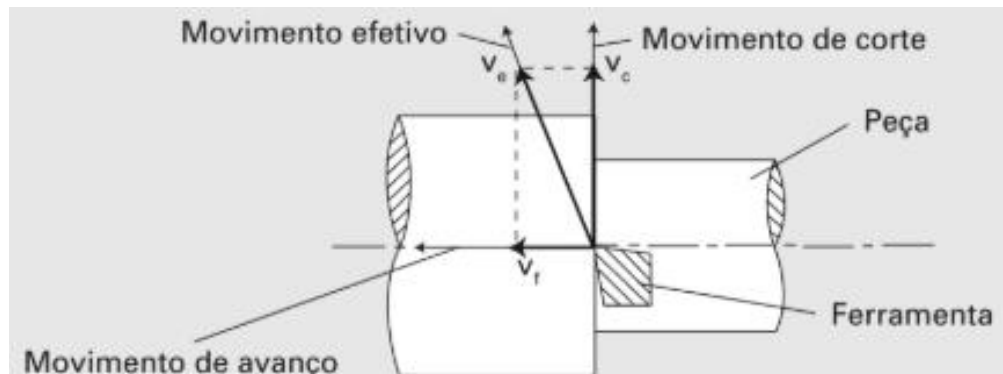
Movimento de corte: esse movimento por si só, sem o movimento de avanço, ocasiona uma única retirada de material na forma de cavaco.

Movimento de avanço: em conjunto com o movimento de corte, esse movimento permite uma retirada contínua do material.

Movimento efetivo de corte: resulta dos dois movimentos mencionados anteriormente, de corte e de avanço, quando realizados simultaneamente. É ele quem permite que ocorra a usinagem de fato.

Outros parâmetros importantes no processo de torneamento são as suas velocidades. No presente trabalho serão abordadas as que são envolvidas efetivamente na formação de cavaco: velocidade de corte (V_c), de avanço (V_f) e a velocidade efetiva de corte (V_e). A Figura 4 ilustra os movimentos e suas respectivas velocidades:

Figura 4 – Movimentos e velocidades de corte, de avanço e efetivo no torneamento



Fonte: Machado et al. (2011).

Velocidade de corte: tomando como referência o ponto da aresta de corte da ferramenta, essa é a velocidade instantânea tangencial à peça que está sendo usinada, seguindo a direção e sentido de corte.

Velocidade de avanço: assim como a velocidade de corte, essa velocidade é instantânea, porém segue a direção e sentido de avanço.

Velocidade efetiva de corte: é a velocidade instantânea equivalente à direção e sentido do movimento efetivo de corte, sendo a soma vetorial da velocidade de corte e da velocidade de avanço.

O *avanço* (f) trata-se do percurso que a ferramenta avança a cada rotação completa, expresso em mm/volta.

A *profundidade de corte* (a_p) corresponde à medida da profundidade de penetração da ferramenta de corte em relação à peça. Essa medida é perpendicular ao plano de trabalho (DINIZ et al., 2013). Corresponde à espessura do material que será removido na forma de cavaco (AMORIM, 2002).

Os parâmetros de corte possuem grande influência em todo o processo de torneamento, portanto é de suma importância que sejam avaliados e estudados mais a fundo em trabalhos científicos.

3.2.1.1 Influência dos parâmetros de corte

A velocidade de corte possui grande influência no desgaste da ferramenta, consequentemente na sua vida útil. Também influencia muito na temperatura resultante do processo (DINIZ et al., 2013). Se comparada com a baixa velocidade de corte, ao aumentar-se a velocidade, há um aumento de produtividade e eliminação de APC (Aresta Postiça de Corte),

porém esse aumento de velocidade também acarreta aspectos negativos, tais como maior desgaste da ferramenta e custo elevado (BONFÁ, 2013).

O avanço também influencia grandemente a produtividade e outros aspectos do processo como um todo. Por exemplo, quanto maior o avanço, menor o tempo de corte e maior a produtividade. Em contrapartida, exige maiores forças de corte e o resultado final seria uma peça com pior acabamento (MACHADO et al., 2011).

Para uma melhor combinação entre os parâmetros, são realizados estudos, análises e comparações para que a produção seja favorecida, com maior qualidade dos produtos finais, além de buscar a otimização da vida útil da ferramenta de corte, com menores custos, tornando o processo mais lucrativo e eficaz.

3.2.2 Torneamento de aços endurecidos

O torneamento de aços endurecidos vem sendo aplicado na produção de diversos tipos de peças, tais como engrenagens, rolamentos e eixos. Um dos principais atrativos do torneamento de aços endurecidos é a sua capacidade de substituir a etapa de retificação durante o processo de acabamento, etapa essa que possui custo elevado.

Embora o processo de torneamento de aço endurecido seja muito vantajoso, como mencionado, também existem desvantagens e pontos de atenção ao se utilizar desse processo. Um exemplo é o desgaste da ferramenta de corte, podendo diminuir a sua vida útil, bem como causar algum tipo de deformação e baixa qualidade superficial da peça usinada (GRZESIK et al., 2007).

Devido a sua grande relevância para o tema, existem diversos estudos que buscam avaliar os impactos, positivos ou negativos, do torneamento do aço endurecido no processo de usinagem, tanto em programas de pós-graduação com os trabalhos de Campos (2015), como em periódicos de universidades escritos por Boing, Noll e Manteli (2017) e congressos (VENTURA; DENKENA, 2016).

Esses estudos trazem algumas recomendações para a realização do torneamento do material endurecido referentes aos cuidados com os parâmetros do processo. Alguns exemplos são a velocidade de corte que deve ser elevada, com valores entre 100 e 250 m/min (DINIZ e OLIVEIRA, 2008); o avanço com valores entre 0,05 e 0,2 mm/rev; e a profundidade de corte não deve ultrapassar o valor de 0,2 mm (ZHOU et al., 2003).

Devido às condições adversas desse processo, tais como elevada dureza das peças de trabalho, grandes forças de corte e elevadas temperaturas na interface peça-ferramenta, deve-se avaliar quais são as melhores opções de materiais a serem utilizados como ferramenta de corte, combinando propriedades como rigidez e resistência ao desgaste (MORE et al, 2006). Segundo Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012), além da dureza do material também são importantes variáveis como o ângulo de corte e as condições de cortes.

3.3 USINAGEM A SECO

Os fluídos de corte auxiliam na lubrificação e refrigeração do processo de usinagem, ou seja, diminuem o atrito e a temperatura durante o processo (GINTING; NOUARI, 2007). Possuem outras funções, tais como remoção do cavaco da zona de corte, proteção da máquina-ferramenta e da peça quanto à oxidação, melhoria no acabamento superficial da peça usinada e minimização do desgaste da ferramenta de corte (MACHADO et al., 2011; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; FERRARESI, 1977).

A sua utilização resulta em maior vida útil da ferramenta de corte e também uma melhor qualidade da peça usinada, porém as suas desvantagens causam impactos tanto em relação à produtividade em si, como em fatores ambientais e até mesmo na saúde do operador da máquina-ferramenta.

Segundo Shashidhara e Jayaram (2010), cerca de 38 milhões de toneladas de lubrificantes foram utilizados no mundo todo em 2005 e aproximadamente 85% desses lubrificantes são óleos originários do petróleo, causando grande impacto ambiental através da contaminação do solo, da água e do ar.

Outro fator de extrema importância são problemas gerados pelo uso de lubrificantes relacionados à saúde dos operadores. Uma vez que esses fluídos entram em contato direto com a pele, podem causar irritações e alergias. Podem, também, desencadear problemas respiratórios, se inalados (SIMUNOVIC; SIMUNOVIC; SARIC, 2015).

Por fim, a utilização de lubrificantes também acarreta custos que podem ser associados à sua aquisição, preparo, armazenamento, controle em serviço e posteriormente no seu descarte correto. Segundo Kopac et al. (2001), gastos com lubrificantes representam cerca de 16% do custo total de fabricação da peça.

Com o objetivo de eliminar, ou ao menos diminuir o uso de fluídos nocivos, a usinagem a seco vem se popularizando nas fábricas modernas, porém com a ausência dos lubrificantes as temperaturas do processo tornam-se ainda mais elevadas, o que diminui

drasticamente a vida útil das ferramentas e gera danos à superfície usinada. Devido a essa combinação de fatores, a usinagem a seco vem sendo alvo de estudos para que sua aplicação seja benéfica em termos produtivos e sustentáveis (GOINDI; SARKAR, 2017).

Esses estudos englobam a combinação de condições propícias das ferramentas de corte e dos parâmetros do processo de usinagem. Quanto ao processo, o ideal é buscar maiores avanços e menores velocidades de corte, por exemplo. Já no que diz respeito às ferramentas, devem ser feitas de materiais que possuam baixo coeficiente de atrito, elevada dureza a quente e boa estabilidade química, como por exemplo ferramentas de metal duro com cobertura de nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

3.4 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE

O processo de usinagem consiste na remoção de material e, para isso, um dos princípios básicos é que a ferramenta de corte tenha maior dureza em relação à peça usinada. Em operações de cortes interrompidos, ou de materiais frágeis, outra característica importante para a ferramenta de corte é a tenacidade.

Dureza e tenacidade são propriedades antagônicas, portanto agregar essas duas propriedades ao material da ferramenta tornou-se um desafio e objetivo de diversos estudos. Essa combinação foi obtida devido à produção de ferramentas com diferentes composições químicas, refinamento de grãos, tratamento térmico e controle dos processos de fabricação (MACHADO et al., 2009).

Segundo Shaw (2005), Trent e Wright (2000), Diniz et al (2013) alguns critérios devem ser considerados no momento da seleção do material da ferramenta, tais como: material a ser usinado, tipo de cavaco gerado pela peça, processo de usinagem, condição da máquina operatriz (potência, gama de velocidades e estado de conservação), forma e dimensões da ferramenta, custo do material da ferramenta, parâmetros de usinagem e características finais do produto.

As propriedades do material da ferramenta de corte podem assumir maior ou menor relevância, de acordo com os critérios mencionados acima, para que então seja feita a seleção do material a ser utilizado. Podemos definir, de todo modo, as principais propriedades desejáveis, as quais, segundo Diniz et al. (2013), são:

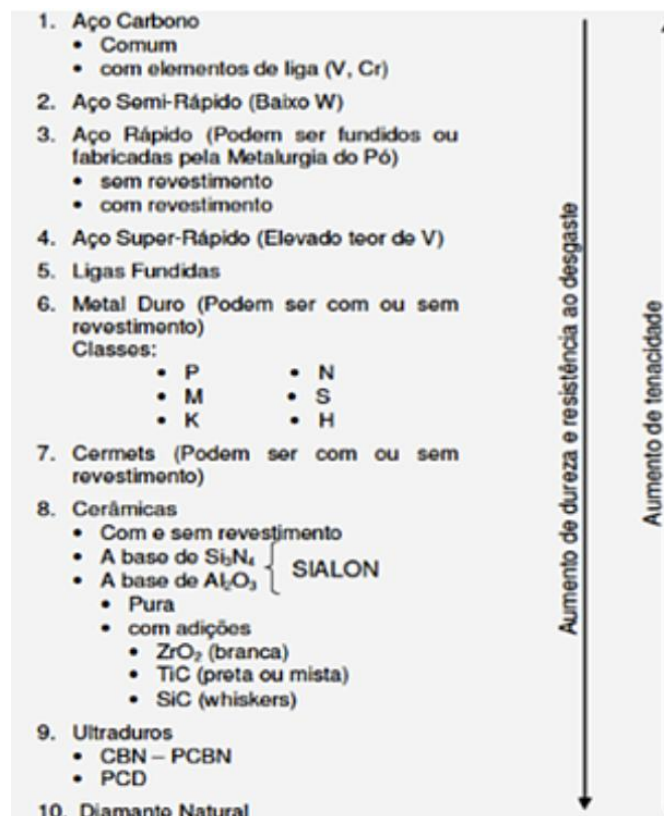
- *Dureza a quente:* a temperatura da ferramenta pode ultrapassar 1000° C, dependendo do tipo de operação. Daí a importância de que as ferramentas

possam atingir a temperaturas como essa com dureza suficiente para suportar as tensões de corte;

- *Resistência ao desgaste*: principalmente a resistência ao desgaste por abrasão, ou seja, resistência ao atrito. A dureza a quente está muito ligada à resistência ao desgaste;
- *Tenacidade*: representa a quantidade de energia necessária para romper o material. Ou seja, uma ferramenta tenaz resiste bem aos choques inerentes do processo;
- *Estabilidade química*: é muito importante em altas velocidades de corte, para evitar o desgaste por difusão.

Atualmente, existe uma grande quantidade de materiais para ferramentas de corte, os quais podem ser agrupados conforme as suas características químicas: aços ferramenta; aços rápidos (com ou sem revestimento); ligas fundidas; metal duro (com ou sem revestimento); cermets; cerâmicas; materiais ultraduros (nitreto de boro cúbico (CBN) e diamante) (MACHADO et al., 2009). A Figura 5 lista cada material na ordem crescente de dureza e decrescente de tenacidade:

Figura 5 – Lista dos materiais para ferramentas de corte.



Fonte: Machado et al. (2009).

Com o avanço de estudos e da tecnologia, as ferramentas tornaram-se mais robustas e precisas. Esses avanços proveram melhores propriedades de resistência ao desgaste, tenacidade e dureza a quente.

3.4.1 Metal duro

O metal duro é um dos materiais para ferramenta de corte mais importantes na indústria moderna, pois combina dureza à temperatura ambiente, resistência ao desgaste, dureza a quente e tenacidade por meio de variações na sua composição (FERRARESI, 1977).

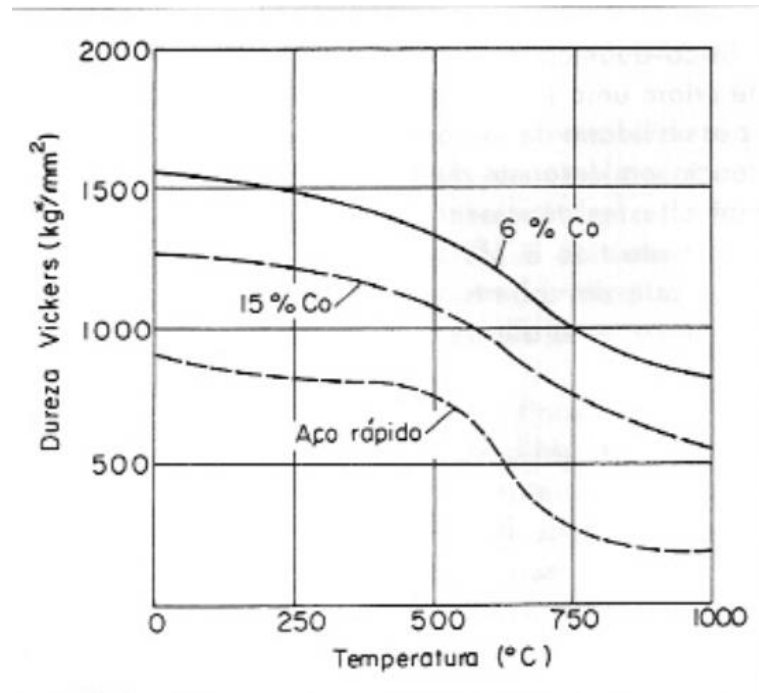
Segundo Machado et al. (2011), o desenvolvimento desse material é considerado o segundo grande impulso no desenvolvimento de materiais para usinagem, pois possibilitou o aumento das velocidades de corte em praticamente dez vezes (de 35 m/min para 250 a 300 m/min).

Trata-se de um produto da metalurgia do pó, o qual é sinterizado com um ou mais metais do grupo ferro (ferro, níquel ou cobalto). As partículas duras são carbonetos de tungstênio, os quais podem se combinar com outros carbonetos, tais como o carboneto de titânio, de tântalo e de nióbio (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Os grãos dos carbonetos são solúveis um no outro, sendo capazes de formar carbonetos por eles mesmos, mas as ferramentas de corte necessitam de um metal ligante que fortaleça o material e que segure os grãos juntos durante o corte, evitando a fratura. O elemento tradicionalmente utilizado como metal aglomerante é o cobalto (KOELSCH, 2000).

A Figura 6 mostra o quanto a dureza varia em função da temperatura. Duas curvas representam um material de metal duro com diferentes teores de cobalto e a terceira curva é relativa ao aço rápido, para efeitos de comparação.

Figura 6 – Influência da porcentagem de cobalto e da temperatura na dureza do metal duro



Fonte: Diniz et al. (2013).

As partículas que constituem este material possuem tamanhos variados entre 1 e 10 μm e ocupam um volume entre 60 e 95% do volume total do material. Atualmente é possível produzir partículas com 0,1 μm e, com isso, melhorar propriedades do material como resistência ao desgaste, dureza e tenacidade, uma vez que partículas menores possuem um maior fator de empacotamento (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

É possível controlar características como porosidade e a microestrutura do material para que se altere sua capacidade de corte. Porém, atualmente o metal duro recoberto vem ocupando cada vez mais o espaço do metal duro sem revestimento no mercado, o qual vem sendo utilizado somente na usinagem do alumínio e em operações especiais (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

3.4.2 Metal duro revestido

O revestimento da ferramenta de metal duro melhora significativamente o desempenho do material, se comparado às ferramentas de metal duro sem revestimento, o que estimula a sua implantação no mercado. Hoje em dia, os metais duros revestidos representam 95% de todo o metal duro utilizado. Outro grande atrativo é a constante diminuição de custo, conforme o crescente domínio das técnicas de revestimento (MACHADO et al., 2009).

O principal objetivo das camadas de revestimento é unir propriedades consideradas inconciliáveis em uma mesma ferramenta, em especial a tenacidade característica do metal duro, e a resistência ao desgaste e dureza a quente presentes nas camadas mais externas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Essa união de propriedades favorece consideravelmente o aumento da vida útil da ferramenta.

Em termos de processo de usinagem, a ferramenta de corte se torna mais eficiente, o que se traduz em aumento da velocidade de corte e maior volume de cavaco produzido por tempo. Essa tecnologia de revestimento de ferramentas de corte possibilita o aumento significativo da produtividade do processo de usinagem como um todo (SCHULZ et al., 2000).

O revestimento do metal duro pode ser realizado pelo processo de Deposição Química a Vapor (CVD, *Chemical Vapour Desposition*) e pelo processo de Deposição Física a Vapor (PVD, *Physical Vapour Deposition*). O Quadro 1 mostra algumas características de cada processo.

Quadro 1 – Características dos revestimentos CVD e PVD

Processo	CVD	PVD
Temperatura	800° C - 1100° C	200° C - 500° C
Cobertura	Carbonetos, Nitretos e Óxidos	TiN, TiCN e TiAlN
Espessura	2 - 20 μm	2 - 7 μm
Propriedades	Maior número de combinações possíveis; Boa aderência da cobertura.	Aresta de corte viva; Menos tensões entre substrato e cobertura

Fonte: adaptado de Abele & Dörr (2002).

A elevada temperatura dos processos CVD aumenta a fragilidade nos substratos de metal duro revestidos por esse processo. São geradas tensões internas termicamente induzidas, as quais podem causar trincas (ABELE; DÖRR, 2002).

O processo PVD é utilizado para revestimento de aços rápidos e metal duro. O material de revestimento é transferido ao substrato do metal que será revestido através de vaporização. Devido às temperaturas mais baixas do processo PVD, o substrato é melhor protegido contra difusões térmicas ou mecânicas (ABELE; DÖRR, 2002). Revestimentos PVD possuem maior densidade de discordância em sua estrutura cristalina, o que contribui para maior dureza.

Os revestimentos também podem ser usados com lubrificantes sólidos, o que possibilita a usinagem a seco. Essas camadas lubrificantes possuem em sua base uma camada

de material duro, em que é depositada uma camada de material macio, ou uma segunda camada de material duro com propriedades lubrificantes, como o TiN (SCHULZ et al., 2000).

A escolha das camadas que serão adicionadas depende muito do material a ser usinado e do processo de usinagem. Segundo Abele & Dörr (2002), os seguintes revestimentos podem ser aplicados aos insertos de metal duro:

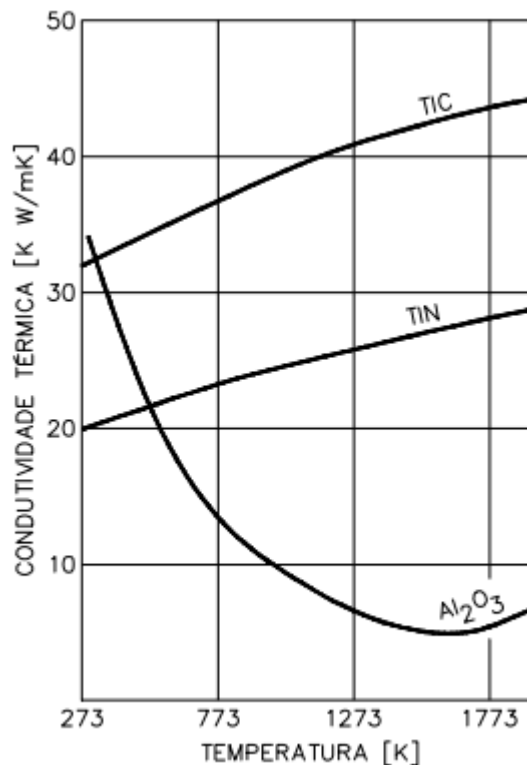
- Carboneto de titânio (TiC);
- Nitreto de titânio (TiN);
- Óxido de alumínio (Al₂O₃);
- Carbonitreto de titânio (TiCN);
- Nitreto de titânio alumínio (TiAlN);
- Nitreto de cromo alumínio (AlCrN).

3.4.2.1 TiN + TiAlN

O nitreto de titânio (TiN) é quimicamente mais estável que o TiC, ou seja, possui menor tendência de difusão em aços (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Sua estabilidade química vai até 600 °C, por isso não faz parte dos revestimentos produzidos pelo processo CVD, conforme citado anteriormente. O uso desse revestimento faz com que haja uma menor formação de crateras na superfície de saída da ferramenta, se comparado ao revestimento de TiC (TRENT; WRIGHT, 2000).

O TiN proporciona um menor coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta de corte, por isso normalmente é utilizado como a camada mais externa. A espessura dessa camada varia entre 5 e 7 µm (MACHADO et al., 2009). Serve, também, como uma barreira ao desgaste do material por transferência térmica. A Figura 7 mostra que a variação da condutividade térmica no TiN com o aumento da temperatura é a menor, se comparada com TiC e Al₂O₃. Em termos de condutividade térmica, o TiN apresenta melhor propriedade do que o TiC, uma vez que para o revestimento, quanto menor condutividade térmica, melhor.

Figura 7 – Influência da temperatura na condutividade térmica dos principais revestimentos utilizados nas ferramentas de corte



Fonte: Wertheim (2002).

Um derivado muito importante do nitreto de titânio é o nitreto de titânio-alumínio (TiAlN). Durante o processo de deposição, parte dos átomos de titânio são substituídos por átomos de alumínio. Esses átomos de alumínio são retidos no material em forma de solução sólida, provocando o endurecimento e consequentemente melhorando a resistência ao desgaste da camada.

O TiAlN se destaca no processo de usinagem a seco, em especial no torneamento de peças endurecidas com corte a seco, substituindo a etapa de retificação, a qual possui elevado custo. Outras propriedades relevantes desse revestimento é a maior resistência à oxidação, baixa condutividade térmica, elevada estabilidade química e alta dureza a frio e a quente (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Este revestimento representa um alto desempenho em parâmetros de corte mais elevados, como altas velocidades de corte e de avanço. Além disso, aumenta a vida útil da ferramenta, por protegê-la de oscilações térmicas advindas do calor produzido pelo atrito durante o processo (LAURO et al., 2014). Devido à grande variabilidade de sua estequiometria, é possível obter diversos produtos com diferentes aplicações, como por exemplo na usinagem de ferro fundido e de superligas de níquel (MACHADO et al., 2009).

Todas as propriedades expostas combinadas entre si buscam otimizar a vida útil da ferramenta de corte, devido às condições adversas ao longo do processo de usinagem, especialmente aos esforços solicitados a elevadas temperaturas. Busca-se diminuir ou controlar os desgastes sofridos pela ferramenta de corte.

3.5 DESGASTES DAS FERRAMENTAS DE CORTE

A vida da ferramenta corresponde ao tempo em que a mesma trabalha efetivamente, até que perca a sua capacidade de corte, ou até que se atinja um critério pré-estabelecido que caracterize o seu fim (FERRARESI, 1977). Portanto, a vida da ferramenta nada mais é do que o tempo entre duas substituições sucessivas necessárias. A rapidez com que a vida da ferramenta chega ao fim está diretamente ligada às propriedades mecânicas e interações químicas entre a ferramenta e a peça, bem como aos parâmetros de usinagem.

A quebra das ferramentas de corte é um grande problema encontrado no processo de usinagem, devido a fatores como o tempo em que a máquina ficará parada para a troca ou manutenção desta ferramenta, o que acarreta na diminuição da produtividade; bem como o gasto envolvido na substituição ou recuperação da ferramenta (MACHADO et al., 2009).

Entender o processo com que as ferramentas se desgastam é a melhor maneira para aplicar correções efetivas que aumentem a sua vida útil. Uma ferramenta de corte pode perder eficiência por meio de três fenômenos: a avaria, o desgaste e a deformação plástica. Esses fenômenos causam alterações na geometria da aresta de corte, seja por remoção de material, ou seu deslocamento (MACHADO et al., 2009).

A avaria é um fenômeno repentino e inesperado, o qual é causado pela quebra, lasca, ou trinca da ferramenta de corte. Promove a perda de massa da ferramenta, ou seja, é responsável pela remoção do material. A avaria ocorre, de modo geral, em processos de corte interrompido, como o fresamento, sendo mais rara a sua ocorrência em processos de corte contínuo, como o torneamento, exceto em condições de corte que excedam as recomendadas para a ferramenta (MACHADO et al., 2009).

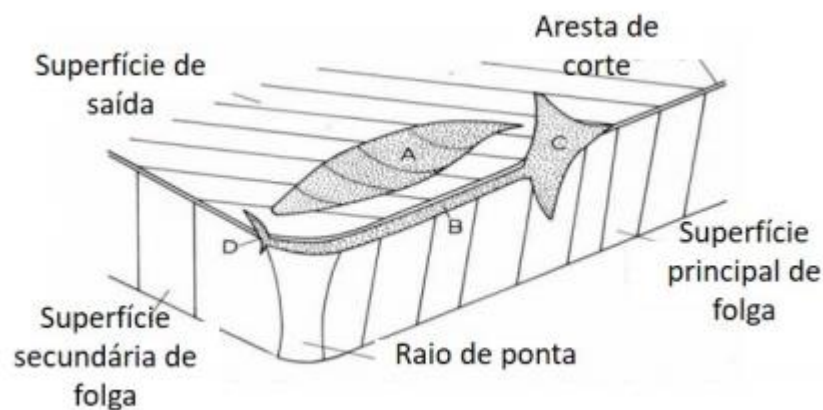
O desgaste é um processo no qual a perda de massa do material ocorre de forma gradativa, de forma contínua e progressiva, em pequenas proporções. Isso acarreta na perda, também gradual, do poder de corte, ocasionando um aumento de potência que é requisitada pela máquina operatriz. Diferente das avarias, o desgaste é observado tanto em processos de corte interrompido, como nos de corte contínuo e ocorre nas superfícies de folga e de saída da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

A deformação plástica é o único dos três fenômenos mencionados em que a mudança da geometria da aresta de corte se dá pelo deslocamento do material, e não pela sua remoção. Esse deslocamento ocorre por cisalhamento, devido às altas tensões a que são submetidas a superfície da ferramenta. É mais comum em ferramentas com maior tenacidade, dentre elas a de metal duro (MACHADO et al., 2009).

Os danos citados podem ser causados por diversos fatores que ocorrem simultaneamente, podendo ser de origem térmica, abrasiva, química e mecânica (SOUZA, 2011). Conforme visto, os fenômenos que se aplicam ao presente estudo são os de desgaste e deformação plástica, os quais serão aprofundados a seguir, bem como os seus respectivos mecanismos de formação.

As principais formas de desgaste que ocorrem no processo de torneamento são: desgaste de flanco, de cratera e de entalhe, conforme mostrado na Figura 8. Esses desgastes podem ocorrer simultaneamente na mesma ferramenta de corte, porém geralmente um deles se destaca e deve ser utilizado como o critério de fim de vida da ferramenta.

Figura 8 – Esquema dos principais tipos de desgaste: A - Desgaste de cratera; B - Desgaste de flanco; C e D - Desgaste de entalhe



Fonte: adaptado de Dearnley e Trent (1982).

O desgaste de flanco (ou frontal) ocorre na superfície de folga da ferramenta. É o tipo de desgaste mais comum nas operações de torneamento, ocasionado pelo atrito entre a peça e a superfície de folga da ferramenta. Em geral é incentivado pelo aumento da velocidade de corte e gera não conformidades que podem levar até mesmo ao descarte da peça usinada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

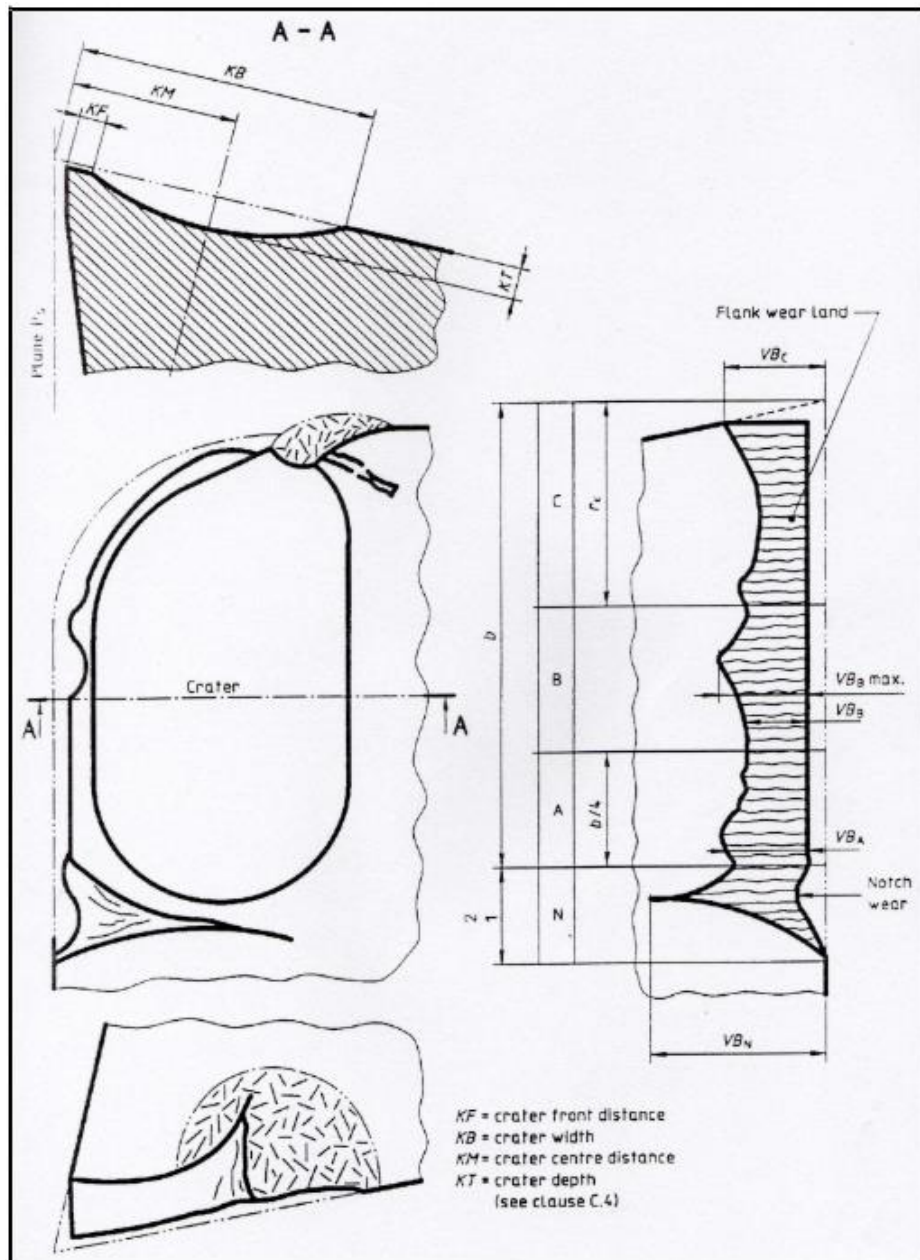
Devido à facilidade de verificação e medição da região do desgaste de flanco, bem como sua grande ocorrência, este é amplamente utilizado como critério de fim de vida da ferramenta. É possível acompanhar a evolução desse desgaste indiretamente com o monitoramento das forças de corte e de avanço, da vibração da ferramenta e da potência elétrica consumida, pois todos esses fatores são elevados com a presença desse tipo de desgaste, devido ao aumento da área de contato entre a ferramenta e a peça usinada (COSTA, 1995).

O desgaste de cratera ocorre na superfície de saída da ferramenta de corte, causado pelo atrito entre a ferramenta e o cavaco formado, aliado à elevada temperatura gerada nessa interface. Esse desgaste é minimizado quando a ferramenta utilizada é de metal duro revestido (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

O desgaste de entalhe pode ocorrer nos dois extremos de contato entre a superfície de folga e a peça, mudando a forma da ponta da ferramenta e influenciando no acabamento da superfície usinada. Esse desgaste é incentivado pelo aumento da temperatura e da velocidade de corte. Normalmente ocorre na usinagem de materiais resistentes a elevadas temperaturas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

A norma ISO 3685/1993 quantifica os desgastes das ferramentas de corte, definindo critérios para que a mesma seja reafiada ou substituída. Nesta norma, é determinado como a medição de cada desgaste deve ser realizada. Para o desgaste de flanco, é realizada a medida da largura do desgaste utilizando um valor médio (VB) e um valor máximo (VBmax) da mesma; no desgaste de cratera, é medida a profundidade máxima da cratera (KT), a largura da cratera (KB) e a distância do centro da cratera à aresta de corte (KM); os entalhes gerados na superfície de folga são medidos por VBN e VBC (SOUZA, 2011), conforme mostrado visualmente na Figura 9.

Figura 9 – Alguns tipos de desgaste em ferramentas de usinagem



Fonte: Norma ISO 3685 (1993).

De acordo com a norma, os critérios que devem ser adotados como limites para que as ferramentas de metal duro sejam reafiadas ou substituídas, são:

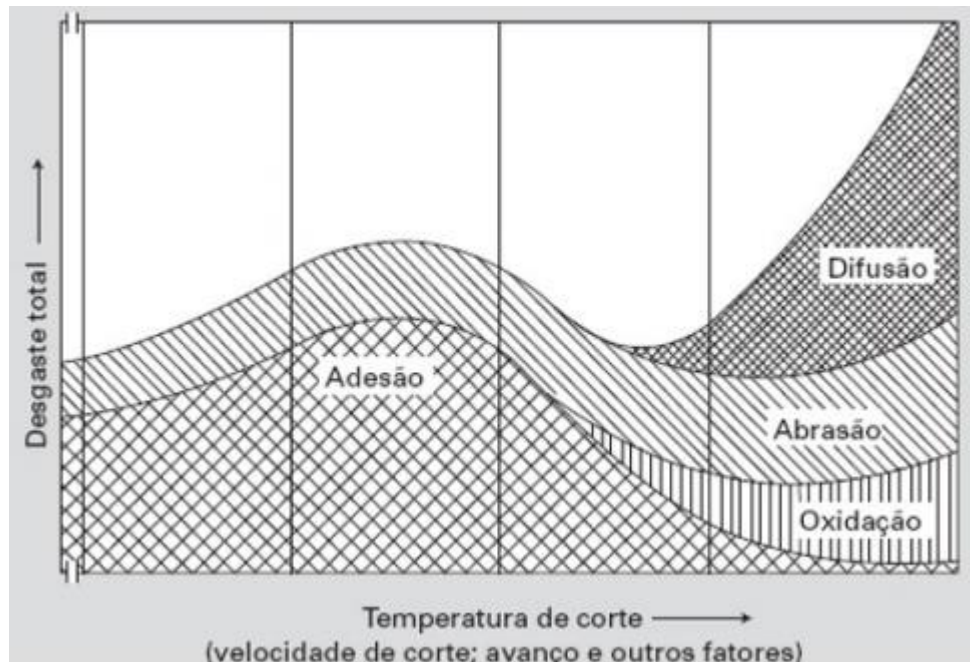
- Desgaste de flanco médio, $VB = 0,3 \text{ mm}$;
- Desgaste de flanco máximo, $VB_{Max} = 0,6 \text{ mm}$, caso o desgaste não ocorra de forma regular ao longo do flanco;
- Profundidade da cratera, $KT = 0,06 + 0,3f \text{ [mm]}$, em que f representa o avanço;
- Distância frontal entre cratera e flanco, $KF = 0,02 \text{ mm}$;
- Falha catastrófica.

Embora existam variações quanto à classificação dos mecanismos de desgaste na literatura, grande parte dos trabalhos existentes considera quatro mecanismos básicos: difusão, adesão, abrasão e oxidação (TELES; FERREIRA, 2007), os quais serão descritos a seguir.

- *Difusão*: ocorre devido a elevadas temperaturas, proporcionando a mobilidade dos átomos da ferramenta de corte e da peça. É a transferência de átomos entre os materiais, com isso provoca alterações nas propriedades da camada superficial da ferramenta. Dois fatores que influenciam grandemente no mecanismo de difusão são: a temperatura e a afinidade físico-química dos elementos que compõem os materiais envolvidos na zona de cisalhamento secundário. Costuma se intensificar em altas velocidades de corte e grandes avanços (AMORIM, 2002);
- *Adesão*: ocorre devido a elevadas temperaturas e pressões presentes na zona de corte, em que há “soldagem” entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta. Está associada à ocorrência da aresta postiça de corte (APC). Em velocidades de corte baixas, o desgaste advindo da APC é relativamente elevado em ferramentas de metal duro (FERRARESI, 1977). Essa aresta postiça cresce gradualmente, até que ocorre seu rompimento de maneira brusca, fazendo com que partículas da superfície da ferramenta também sejam removidas;
- *Abrasão*: é uma das principais causas de desgaste da ferramenta, em que ocorre remoção do material através de micro-cortes e trincamentos. Pode gerar desgaste frontal e de cratera, porém o desgaste mais sobressalente nesse caso é o frontal, pois a superfície de folga atrita com um elemento rígido (peça), já a superfície de saída atrita com um elemento mais flexível (cavaco). A elevada dureza a quente do material da ferramenta minimiza o desgaste por abrasão (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013);
- *Oxidação*: ocorre, na maioria dos metais, devido ao meio em que está encontrada a zona de corte, sendo potencializada por elevadas temperaturas de corte e pela presença de ar e água no processo. A maioria dos fluídos de corte utilizados possuem elementos antioxidantes em sua composição, portanto os fluídos em si não são responsáveis diretos por esse fenômeno. O que de fato propicia a oxidação, nesse caso, é quando não são tomadas as precauções necessárias para a conservação deste fluído na máquina (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

A Figura 10 relaciona a evolução dos mecanismos de desgastes com o aumento da temperatura do processo:

Figura 10 – Diagrama mecanismos de desgaste *versus* temperatura de corte



Fonte: Machado et al. (2011).

3.6 FORMAÇÃO DE CAVACO

A formação de cavaco possui grande influência nos processos de usinagem, pois afeta características como desgaste da ferramenta, calor gerado e os esforços envolvidos no corte. Também influencia em aspectos econômicos, de segurança e na qualidade da peça usinada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

De acordo com Machado et al. (2009), o mecanismo de formação de cavaco pode ser dividido em quatro estágios: recalque inicial, deformação e ruptura, deslizamento das lamelas e, por fim, a saída do cavaco.

No recalque inicial, ocorre o início da penetração da ferramenta de corte em uma porção da peça. Uma pequena porção do material da peça começa a ser comprimida contra a superfície de saída da ferramenta de corte. Nessa etapa a peça é recalcada, ou seja, sofre deformação plástica e elástica, ainda sem a remoção efetiva do material.

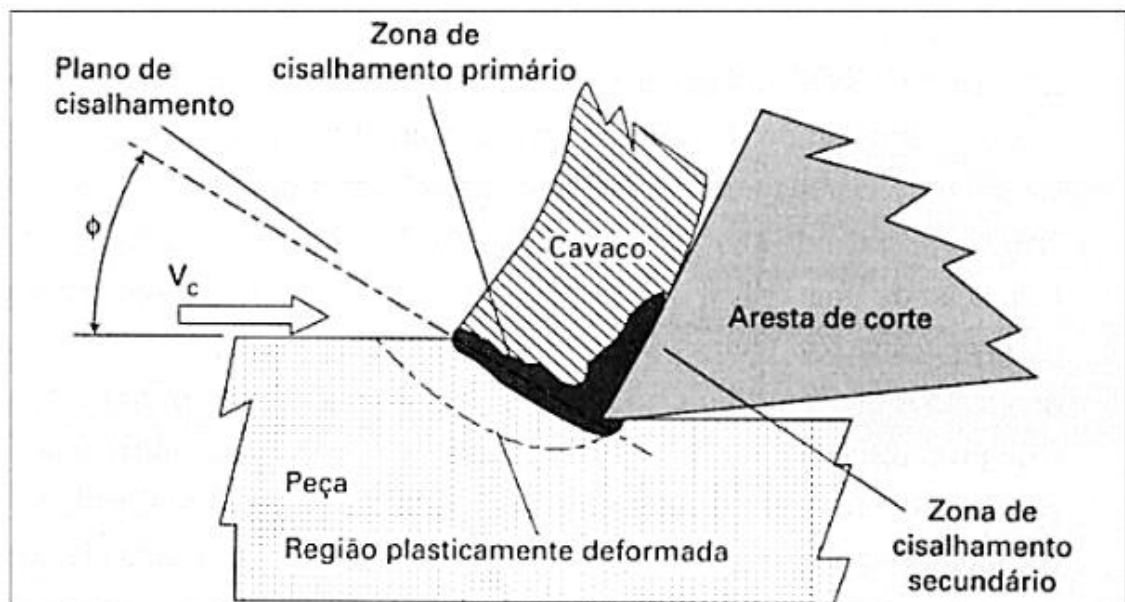
Na deformação e ruptura, o material recalcado sofre deformação elástica e, posteriormente, deformação plástica, a qual sofre aumento progressivo até que as tensões de cisalhamento sejam suficientes para iniciar um deslizamento. A Figura 11 esquematiza o

plano de cisalhamento primário, entre a peça e o cavaco, o qual é definido pelo ângulo de cisalhamento (ϕ) formado entre o plano de cisalhamento e a direção da velocidade de corte (V_c).

O deslizamento das lamelas nada mais é do que o deslizamento entre a porção de material recalcada e a peça, dando continuidade à penetração da ferramenta, o que gera a ruptura total ou parcial da porção do material acompanhando o plano de cisalhamento. Essa porção de material rompido da peça usinada é o cavaco, o qual pode ser classificado de acordo com os seus diferentes tipos e formas.

Na saída do cavaco, o material rompido na etapa de deslizamento das lamelas é deslocado para a superfície de saída da ferramenta, por meio do movimento relativo entre a peça e a ferramenta. Enquanto isso, todo o processo de formação de cavaco se reinicia, gerando uma nova porção de material ainda aderido à peça, conforme a etapa de recalque inicial, até que o cavaco seja formado novamente. Esse comportamento cíclico caracteriza a formação de cavaco como um processo periódico (MACHADO et al., 2009).

Figura 11 – Mecanismo de formação de cavacos



Fonte: Machado et al. (2009).

Existem diversos tipos de classificações de cavacos, sendo mais comumente utilizada a classificação de acordo com a sua morfologia. Essa classificação divide o cavaco em contínuo, de cisalhamento e de ruptura (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

O cavaco contínuo é composto por lamelas justapostas em uma disposição contínua, não sendo possível distinguir tais lamelas; já o cavaco de cisalhamento é constituído por lamelas justapostas distintas entre si, sendo formado a partir do cisalhamento de porções do material e posterior soldagem das mesmas. O cavaco de ruptura possui fragmentos arrancados da peça usinada, os quais permanecerão separados, apresentando menor superfície de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, o que diminui o atrito nesse caso (FERRARESI, 1977).

Segundo Diniz et al. (2013), a diferença entre o cavaco contínuo e o de cisalhamento pode não ser tão clara e é possível que haja alternância entre um e outro, dependendo das ferramentas utilizadas e de parâmetros de corte aplicados no processo.

O material da peça usinada influencia diretamente no tipo de cavaco que será formado no processo. Um material dútil, o qual apresenta elevada capacidade de deformação plástica sem que ocorra a fratura, geralmente gera cavacos contínuos. Esse tipo de cavaco não é indicado para a produção, pois pode causar acidentes, enroscar na peça e no suporte da ferramenta, além de ocupar muito espaço. Sua dificuldade de manuseio ocasiona atrasos na produção e também pode acarretar em acabamento inferior da peça (YALLESE et al., 2009).

As peças frágeis geram cavacos descontínuos e quebradiços, como o cavaco de ruptura, os quais são mais indicados para a produção, pois não possuem nenhuma das desvantagens presentes nos cavacos contínuos, além de serem ideais para reciclagem e para serem fundidos novamente. No torneamento de peças duras, a maior parte do calor gerado é dissipado através do cavaco, especialmente a altas velocidades. Com isso, há uma significativa diminuição na temperatura da ferramenta e da peça (YALLESE et al., 2009).

A norma ISO 3685:1993 classifica as formas do cavaco em fita, helicoidal, espiral, lasca e pedaço, as quais são apresentadas na Figura 12.

Figura 12 – Classificação do formato de cavaco

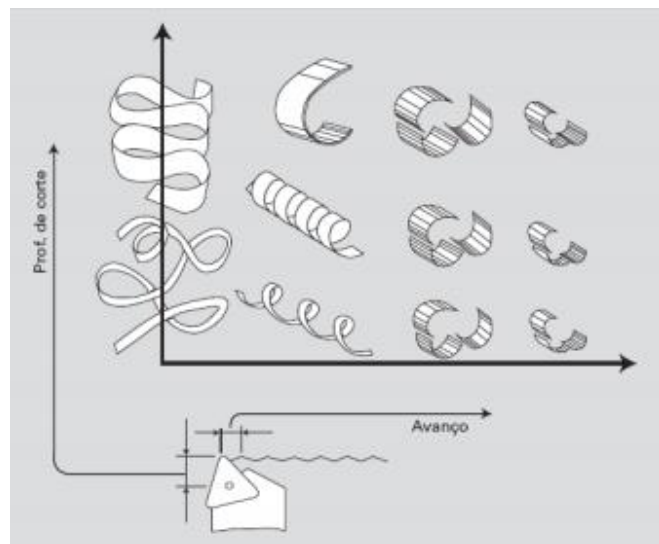
1- Cavaco em fita	2- Cavaco tubular	3- Cavaco espiral	4- Cavaco helicoidal tipo arruela	5- Cavaco helicoidal cônico	6- Cavaco em arco	7- Cavaco fragmentado	8- Cavaco tipo agulha
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conectado		
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto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

Fonte: adaptado ISO 3685 (1993).

Normalmente a forma helicoidal é a mais recomendada, pois o cavaco em formato de fita ocupa muito espaço, é difícil de ser transportado, além de poder gerar danos ao processo e à peça (FERRARESI, 1977).

A forma do cavaco, assim como o seu tipo, possui como principal fator de influência o material da peça usinada, além da forma da ferramenta de corte e dos parâmetros do processo. Dois parâmetros que possuem grande influência sobre a forma do cavaco gerado são a profundidade de corte e o avanço (MACHADO et al., 2009), o que pode ser visualizado graficamente na Figura 13.

Figura 13 – Variação da forma dos cavacos com a profundidade de corte e o avanço



Fonte: Machado et al. (2009).

A profundidade de corte possui grande influência na estabilidade do processo de torneamento, na energia demandada durante o mesmo (NING; RAHMAN; WONG, 2001), no desgaste da ferramenta, na integridade superficial da peça trabalhada e também na formação de cavaco (ZEILMANN et al, 2004).

3.7 VARIÁVEIS DE SAÍDA

As variáveis de saída do processo de torneamento estudadas no presente trabalho, são: rugosidade, potência de usinagem, emissão acústica e vibração. Tais variáveis serão analisadas com a finalidade de entender o comportamento do processo ao utilizar-se ferramenta de corte de metal duro, uma vez que a interação entre a ferramenta e a peça usinada influencia diretamente estas variáveis.

3.7.1 Rugosidade

Durante o processo de usinagem, variáveis como elevadas temperaturas, vibrações e reações químicas podem alterar a superfície e até mesmo a estrutura do produto final. O acabamento da peça pode ser medido por diversos aspectos, dentre eles a rugosidade, a qual é a forma mais utilizada pela indústria para determinar e avaliar a qualidade superficial do produto usinado (MACHADO et al., 2009).

Como senso comum, entende-se que quanto menor a rugosidade, melhor o acabamento do produto, porém nem sempre deseja-se uma menor rugosidade da superfície, podendo variar de acordo com a aplicação da peça usinada: no caso de mancais e calibradores, é importante que a superfície tenha uma baixa rugosidade, pois o atrito deve ser minimizado; já no caso de sistemas de freio, é interessante que se obtenha uma superfície com maior rugosidade, pois nesse caso é importante que haja atrito entre as peças (MACHADO et al., 2009).

A rugosidade é considerada um erro microgeométrico, tem como unidade de medida o micrômetro (μm) e é medida por meio de um aparelho eletrônico denominado rugosímetro. Segundo Smith e Hashemi (2012), a rugosidade possui influência significativa na confiabilidade dos componentes mecânicos, daí a importância de se controlar essa variável, pois a qualidade superficial pode influenciar aspectos como deslizamento, ajuste de acoplamento forçado, qualidade de superfícies ópticas, resistência à corrosão e à fadiga, vedação, aderência, escoamento de lubrificantes, além da própria aparência do produto final.

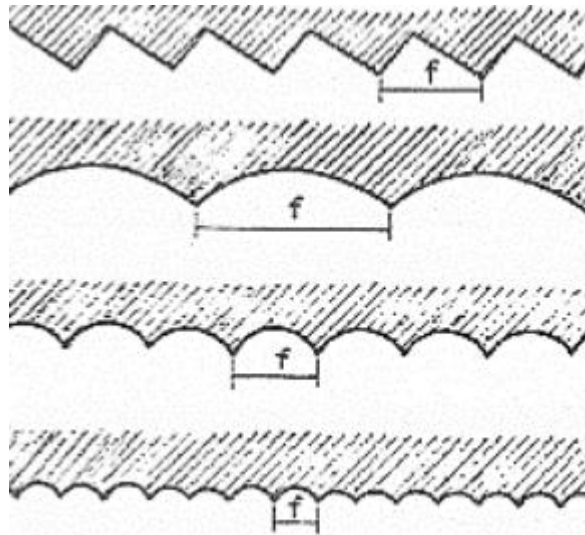
A qualidade superficial também serve como parâmetro de avaliação da produtividade de máquinas-ferramenta, pois o comportamento dos componentes mecânicos depende de uma superfície adequada para sua funcionalidade (BERNARDOS e VOSNIAKOS, 2003). As indústrias atribuem grande importância ao acabamento superficial e precisão dimensional dos produtos da usinagem, exemplificando a medição e caracterização do acabamento no processo de usinagem como um grande diferencial (REDDY e RAO, 2005).

O controle da rugosidade pode ser feito através dos parâmetros de corte, os quais possuem grande interferência na qualidade superficial obtida no processo (ASILTURK; NESELI, 2012). Um exemplo da grande importância de controle da rugosidade está relacionado à resistência à fadiga, uma vez que superfícies mais rugosas possibilitam maior concentração de tensões, o que facilita o surgimento de trincas de fadiga, comprometendo, portanto, essa propriedade (SMITH; HASHEMI, 2012).

Os parâmetros que mais afetam a rugosidade durante o torneamento de aços endurecidos são a taxa de avanço, a geometria e o desgaste da ferramenta de corte

(OLIVEIRA; DINIZ; URSOLINO, 2009), a dureza do material e as condições de corte (ângulo, velocidade e profundidade) (Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012)). A Figura 14 mostra a variação da rugosidade conforme diferentes avanços e geometrias da ferramenta de corte.

Figura 14 – Aspectos da superfície usinada em função do avanço e da forma da ferramenta



Fonte: Stemmer (1993).

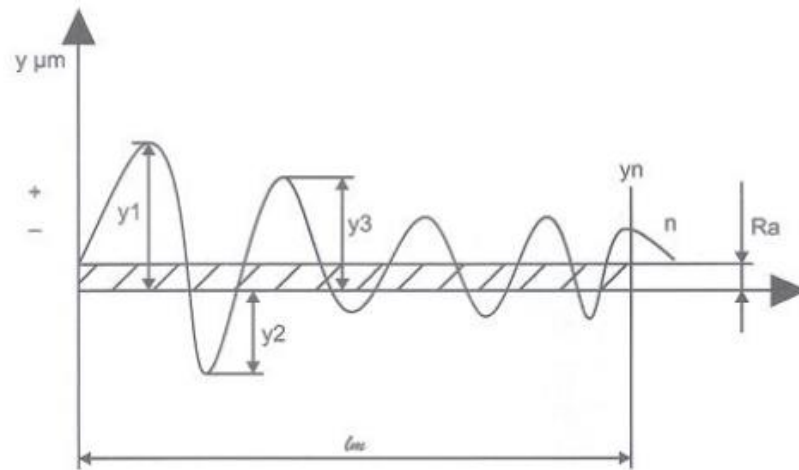
Existem diversos métodos de quantificação e avaliação da rugosidade, dos quais foram selecionados para o presente trabalho os parâmetros de rugosidade média (R_a) e de rugosidade total (R_t), descritos e definidos pela norma ABNT NBR ISO 4287:2002.

3.7.1.1 Rugosidade média

A rugosidade média (*roughness average* - R_a) é caracterizada pelo desvio médio aritmético dos valores absolutos da amplitude dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média dentro do percurso de medição (l_m) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

A determinação da linha de rugosidade média (Figura 15) se dá pelo cálculo da média aritmética de cada valor absoluto de pico e vale presentes ao longo de l_m . Essa linha média é disposta paralelamente à reta de origem no eixo horizontal (NOVASKI, 1994).

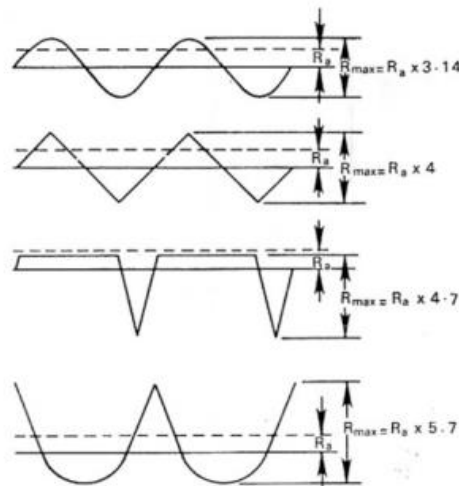
Figura 15 – Rugosidade média



Fonte: Silva Neto (2012).

Esse tipo de medição de rugosidade possui vantagens como facilidade de aplicação, podendo ser aplicado à maioria dos processos de fabricação, além de ser fornecido pela maioria dos equipamentos de medição (PIRATELLI, 2011). Devido à simplicidade de funcionamento dos seus instrumentos de medição, este é o parâmetro mais utilizado na indústria (FERRARESI, 1977).

Por ser um parâmetro estável, não registra interferências de efeitos pontuais. Por conta disso, esse método isoladamente não é considerado suficiente para determinar a qualidade superficial de uma peça, uma vez que superfícies com comportamentos diferentes entre si podem possuir rugosidades médias muito próximas ou até mesmo iguais, mascarando diferenças importantes (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013), conforme mostrado na Figura 16:

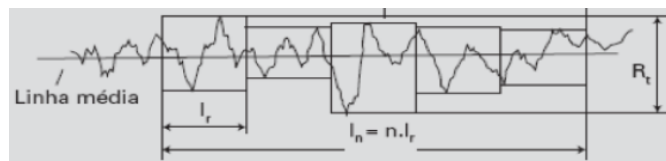
Figura 16 – Diferentes características superficiais que possuem mesmos valores de R_a 

Fonte: Dagnall (1986).

3.7.1.2 Rugosidade total

Uma solução para detectar fenômenos pontuais e atípicos que passariam despercebidos pela medição R_a , é a utilização do parâmetro de rugosidade total (R_t), o qual corresponde à distância vertical entre o pico mais elevado e o vale mais profundo, independentemente dos valores de rugosidade parcial ao longo do comprimento de avaliação (MACHADO et al., 2009). Pode-se observar na Figura 17 um exemplo que mostra os pontos escolhidos para a determinação de R_t .

Figura 17 – Rugosidade total



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (2013).

É possível obter informações sobre a deterioração máxima da superfície através desse parâmetro, o qual é importante para determinação de falhas no processo. O parâmetro R_t não é tão comum quanto o parâmetro R_a , e nem todos os equipamentos o fornecem (PIRATELLI, 2011).

3.7.2 Potência de usinagem

A potência de usinagem pode ser definida como a soma das potências que cada componente da força de usinagem consome durante o processo, dividida em componentes de corte e de avanço da força (MACHADO et al., 2009). As equações (1) e (2) são referentes ao cálculo da potência de corte e de avanço, respectivamente:

$$P_c = \frac{F_c \times v_c}{6,0 \times 10^4} \quad (1)$$

$$P_f = \frac{F_f \times v_f}{6,0 \times 10^7} \quad (2)$$

Utilizando-se as unidades de Newtons [N] para cada força e de [m/min] para as velocidades, tem-se como unidade da potência o kilowatt [kW].

Normalmente, os valores de potência de avanço podem ser desprezados por estes serem significativamente menores do que os de potência de corte (SOUZA, 2011). Segundo Diniz et al. (2013), como a velocidade de avanço é muito pequena em relação à velocidade de corte, isso resulta numa potência de avanço até 140 vezes menor do que a potência de corte. Considerando isso, pode-se aproximar o valor da potência total do motor da máquina-ferramenta, conforme a equação (3):

$$P_{motor} = \frac{P_c}{\eta} \quad (3)$$

Em que η é o rendimento do sistema de transmissão utilizado, o qual varia entre 0,80 e 0,85 para sistemas que possuem motor acoplado; e entre 0,65 e 0,85 em sistemas que utilizam engrenagens ou correias (MACHADO et al., 2009).

A potência de usinagem pode ser mensurada pela medição da tensão e da corrente elétrica consumida durante o processo, sendo a tensão obtida pelo uso de voltímetro e a corrente, de amperímetros em série. Para solucionar problemas de intrusão em máquina-ferramenta advindos do uso do amperímetro dentro do circuito, utiliza-se como alternativa sensores não intrusivos, como por exemplo os que usam transformadores de corrente (MACHADO et al., 2009).

Esses sensores que utilizam transformadores de corrente consistem em dispositivos de Efeito Hall que medem a corrente que passa através de um condutor por indução magnética, de forma que os dispositivos são colocados externamente aos cabos elétricos (MACHADO et al., 2009).

Fatores que podem interferir na potência de corte, de forma indireta, são a geometria da ferramenta e seu estado de afiação, uma vez que influenciam a pressão específica de corte (KS), a qual pode ser relacionada com a força de corte pela equação (4) e, consequentemente, com a potência de usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

$$F_c = K_s \times A \quad (4)$$

Um exemplo prático da importância do monitoramento dos valores de potência no processo de usinagem é o melhor acompanhamento da vida útil da ferramenta de corte. É possível detectar a progressão do desgaste de flanco na ferramenta, pois esse desgaste acarreta

aumento do atrito entre a peça e a mesma, ocasionando aumento indireto na potência de usinagem através do aumento da pressão de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Além do baixo custo para realizar a medição da potência de usinagem em diversas operações, uma grande vantagem nesse tipo de medição é a capacidade de estudar o processo utilizando parâmetros do motor ao invés de parâmetros da região de corte, garantindo que os instrumentos de medição não interfiram no processo (TETI et al., 2010).

3.7.3 Emissão acústica (EA)

O método de monitoramento dos sinais de emissão acústica vem ganhando destaque, dentre outros motivos, pela diminuição de custos com equipamentos para esse tipo de análise (CHOUDHURY; TANDON, 2000). Além disso, essa técnica também é considerada uma das formas mais precisas de supervisão do processo de usinagem (LAURO et al., 2014).

Os sensores de emissão acústica (EA) são capazes de abranger sinais de frequência muito elevados, numa faixa entre 20 kHz e 1 MHz (COCKERILL et al., 2016), possibilitando, deste modo, que sejam detectadas informações acerca de deformações plásticas da peça usinada e do processo de desgaste da ferramenta (HASE; MISHINA; WADA, 2012). Segundo Reddy (2010), a EA corresponde às ondas de tensão que são geradas durante processos dinâmicos que ocorrem no material, cuja energia liberada pode ser medida por um transdutor de alta sensibilidade.

Características como frequência e amplitude do sinal da EA são determinadas pelas propriedades do material e, segundo Neslusan et al. (2015), as fontes de EA correspondem a microdeformações, movimentos de deslocamento, microfraturas e propagação de trincas. Segundo Tan, Irving e Mba (2007), algumas causas de sinais de EA no torneamento podem ser impactos, fadiga cíclica, perda e retirada de material. Neslusan et al. (2015) notaram durante estudos de processos de usinagem que o desgaste da ferramenta é um dos fatores que mais influenciam no aumento de energia deste sinal.

A emissão acústica possui sinais a níveis microscópicos, sendo sensíveis a qualquer alteração estrutural, o que permite detectar defeitos nos seus estágios iniciais. Outra vantagem desse tipo de monitoramento consiste no fato de que o sinal de EA só detecta ondas elásticas de alta frequência, portanto os ruídos típicos do processo de usinagem não interferem na medição (TAN; IRVING; MBA, 2007).

São definidos dois tipos de sinais de emissão acústica: o sinal contínuo, o qual possui um comportamento de amplitude relativamente constante durante um tempo maior, podendo

ser associado à deformação plástica que ocorre na usinagem de materiais mais dúcteis e também ao desgaste da ferramenta de corte; e o sinal transiente, ou de pico, o qual é caracterizado por uma elevada amplitude e pequena duração, representando a propagação de trincas, quebra da ferramenta e choques com o cavaco (SOUTO, 2007 e BHUIYAN; CHOUDHURY; DAHARI, 2014).

3.7.4 Vibração

A análise da vibração do sistema consiste no estudo do movimento de oscilação do corpo em torno da sua posição de equilíbrio, além das forças e momentos associados ao movimento descrito (SOUTO, 2007).

No caso dos processos de usinagem, a vibração é ocasionada pela movimentação cíclica relativa entre ferramenta de corte e peça, quando submetidas a forças resultantes de operação de corte (SIDDHPURA; PAUROBALLY, 2012). Esse movimento é oscilatório e ocorre em corpos rígidos capazes de armazenar energia cinética e que sofram excitação.

Segundo Siddhpura e Paurobally (2012), quando as vibrações entre a ferramenta de corte e a peça usinada são excessivas, possuem caráter destrutivo que pode resultar em peças com baixa qualidade superficial, ruídos, intensificação do desgaste da ferramenta de corte, além do aumento no consumo de energia elétrica.

As vibrações mecânicas geradas pelas variações cíclicas das parcelas dinâmicas e que geram movimentos periódicos na estrutura da máquina-ferramenta podem ser divididas em vibrações forçadas, e auto-excitadas (ou trepidações). Podem, também, ser resultantes de comportamentos aleatórios, das propriedades do material e das condições de corte (SOUZA, 2011).

As vibrações forçadas são decorrentes de forças periódicas advindas de erros de precisão de componentes mecânicos, do desalinhamento da máquina-ferramenta e do desbalanceamento de peças rotativas; já as vibrações auto-excitadas são decorrentes de um mecanismo de auto-excitação durante a formação de cavacos, sendo normalmente relacionadas ao aumento da taxa de remoção de material, à dureza do mesmo e ao tipo de cavaco produzido (KALPAKJIAN; SCHIMID, 2009).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho visa avaliar o torneamento do aço AISI 4340 endurecido, utilizando ferramenta de corte de metal duro revestida com TiAlN+TiN. Para isso, foram realizados experimentos através de ensaios para a determinação dos parâmetros mais apropriados para a continuidade da pesquisa. Nessa seção, serão detalhadas as etapas do desenvolvimento da pesquisa, tais como materiais e equipamentos utilizados, os sistemas de aquisição de dados e a forma de análise dos resultados.

4.1 CORPO DE PROVA

O material utilizado para os corpos de prova foi o aço AISI 4340 endurecido, com dimensões iniciais de 54,5mm de diâmetro e 200mm de comprimento e dureza 55 HRC. A Figura 18 mostra o corpo de prova posicionado na máquina-ferramenta.

Figura 18 – Corpo de prova utilizado



Fonte: produção do próprio autor.

Na Tabela 3, é apresentada a composição química do corpo de prova utilizado:

Tabela 3 – Composição química do aço AISI 4340

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Co	Al
0,400	0,650	0,260	0,016	0,005	0,720	1,750	0,220	0,180	0,032

Fonte: Produção do próprio autor.

4.2 FERRAMENTA DE CORTE

A ferramenta de corte utilizada é de metal duro, recoberta pelo processo PVD com TiAlN+TiN, fornecida pela empresa Seco Tools (Figura 19).

Figura 19 – Ferramenta de corte utilizada



Fonte: produção do próprio autor.

O código da pastilha é CNGG120408-MF1, TS2000. Os dígitos CNGG120408 nos trazem informações importantes sobre a geometria do inserto, conforme mostrado no Quadro 2. De acordo com o restante do código, o quebra cavaco é do tipo -MF1, o qual é recomendado para pastilhas de acabamento ou semi-acabamento. O revestimento com TiAlN e TiN foi feito pelo processo de PVD (TS2000).

Quadro 2 - Nomenclatura de insertos

C	Formato da ferramenta: losango com ângulo EPSR de 80°
N	Ângulo de folga da ferramenta neutro (0°)
G	Tolerância de cada cota da ferramenta
G	Quebra cavaco de ambos os lados com furo no centro da pastilha
12	Medida da aresta de corte [mm]
4	Medida da espessura [mm]
8	Medida do raio de ponta [mm]

Fonte: Produção do próprio autor.

4.3 PROCESSO DE TORNEAMENTO

Para os ensaios, foi utilizado um Centro de Torneamento CNC da marca ROMI, modelo GL 240M com motor principal de 15 kW de potência (Figura 20), o qual está

instalado no Laboratório de Estudo da Usinagem no Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP.

Figura 20 - Centro de Torneamento CNC do laboratório do DMT



Fonte: Produção do próprio autor.

Os parâmetros de corte utilizados e devidamente programados pelo técnico do laboratório no equipamento de torneamento seguiram um planejamento experimental de fatorial completo com três fatores e dois níveis:

- Velocidade de corte (v_c) = 100 e 150 m/min;
- Avanço (f): 0,05 e 0,10 mm/rot;
- Profundidade de corte (a_p): 0,15 e 0,25 mm.

Para cada usinagem, houve uma combinação de diferentes parâmetros (Tabela 4). O planejamento experimental adotado fornece oito combinações diferentes, as quais foram realizadas em duplicata, totalizando dezesseis ensaios.

Tabela 4 - Combinações de parâmetros de corte utilizadas em cada ensaio

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

Fonte: produção do próprio autor.

Com essas diferentes combinações, foi possível identificar o que cada alteração nos parâmetros de corte afetou em termos de potência, vibração, emissão acústica, desgaste da ferramenta de corte, tipo de formação de cavaco e qualidade superficial. Para o experimento, foram mantidos constantes fatores como máquina, operador e temperatura. A cada ensaio usou-se uma aresta de corte nova da ferramenta para a análise do seu desgaste.

4.4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O centro de torneamento CNC é equipado com um sistema de aquisição de dados cuja finalidade dentro do presente experimento é de captar as seguintes variáveis de saída do processo: potência, vibração e emissão acústica.

Para a aquisição das variáveis de saída mencionadas, foi utilizado um sistema computadorizado (Figura 21) com sensores responsáveis por captar, registrar e armazenar sinais de cada uma dessas variáveis, por um módulo de canais e por uma placa de aquisição de dados da marca National Instruments, NI PCI 6220. Essa placa recebe os sinais analógicos dos sensores e os converte em sinais digitais que serão interpretados pelo *software* LabView® 7.1, também da marca National Instruments.

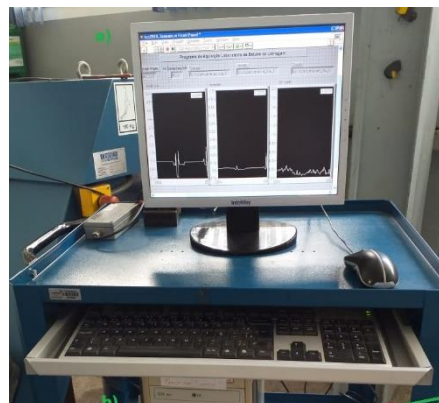
Figura 21 – Sistema de aquisição de dados em que estavam conectados os sensores e a placa de aquisição de dados



Fonte: Produção do próprio autor.

Esse sistema coleta os dados do processo em tempo real, o que possibilitou o acompanhamento de cada variável durante a realização do experimento, através da tela do programa de aquisição de dados desenvolvido no *software* LabView® 7 (Figura 22). Após a coleta, interpretação e armazenamento dos dados, foi possível realizar a análise estatística.

Figura 22 – Computador que rodou o programa de aquisição de dados desenvolvido no *software* LabView® 7



Fonte: produção do próprio autor.

4.4.1 Potência consumida

Para a aquisição da potência consumida pelo motor do centro de torneamento, foi utilizado um sensor transformador de corrente (TC) da marca LEM, modelo AT 100 B10 (Figura 23).

Figura 23 - Sensor de Efeito Hall, marca LEM, modelo AT100 B10



Fonte: produção do próprio autor.

O sinal de potência é captado pelo sensor e armazenado pelo *software* em valores que devem ser convertidos posteriormente em Watts, conforme a equação (5):

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

Em que,

P_c: Potência consumida (Watts);

I: Corrente alternada (Ampères);

U_f: Tensão em uma das fases (Volts);

F_p: Fator de potência (adimensional).

O sensor gera uma saída proporcional de tensão entre 0 a 10 Volts, em função da corrente elétrica no motor. Por esse motivo, o valor que é obtido pelo *software* deve ser convertido em Ampères utilizando a equação (6), fornecida pelo fabricante do sensor:

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

Em que,

I: Corrente de uma das fases (Ampères);

VCC: tensão de corrente contínua (Volts).

Ao substituir o valor da corrente calculado pela equação (6), o fator de potência do motor (0,92), a tensão de fase do motor (220 V) e multiplicar por $3^{1/2}$ por se tratar de um motor trifásico, chegamos à equação (7) de conversão do sinal recebido em Volts para a potência do motor em Watts:

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

4.4.2 Vibração

Para a aquisição dos valores de vibração, foi utilizado um módulo composto por um sensor piezoelétrico (acelerômetro) e um amplificador de sinal, marca Vibro Control, modelo TV100 (Figura 24).

Figura 24 - Módulo de vibração modelo TV100



Fonte: produção do próprio autor.

Os sinais de vibração obtidos em forma de sinais de tensão (Volts) foram convertidos para valores de velocidade (mm/s) utilizando-se a equação (8):

$$V = \frac{25 \times V_{cc}}{8} \quad (8)$$

4.4.3 Emissão acústica

Para a captação de emissão acústica durante o processo, foi utilizado um módulo de emissão acústica da marca PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, composto por um sensor piezoelétrico modelo R15A e amplificador de sinal elétrico com saída retificada em RMS (valor quadrático médio) modelo 1272-1000 (Figura 25).

Figura 25 – Módulo de emissão acústica utilizado. 1) e 2) sensor piezoelétrico, e 3) amplificador de sinal



Fonte: produção do próprio autor.

O sinal elétrico retificado corresponde à unidade de tensão (Volts) e é comumente empregado nessa grandeza para expressar a emissão acústica. Devido a isso, diferente dos sinais captados pelos sensores de potência e de vibração, no caso da emissão acústica não se faz necessária a conversão para outra unidade.

4.5 RUGOSIDADE

Após a usinagem, foi feita a avaliação da integridade superficial das peças utilizadas durante o estudo. Para essa avaliação, foi medida a rugosidade superficial da peça utilizando um rugosímetro da marca Mahr, modelo Marsurf M300 (Figura 26), o qual possui ponta apalpadora em formato de cone esférico feita de diamante e com raio de ponta de 2 μm .

Figura 26 - Rugosímetro da marca Mahr, modelo Marsurf M300



Fonte: produção do próprio autor.

Cada medição da rugosidade foi feita no intervalo entre os ensaios em triplicata, para as diferentes regiões da superfície usinada em cada sequência de usinagem e o equipamento

foi posicionado em cima do corpo de prova entre uma usinagem e outra, de modo que não se fazia necessário retirar o corpo de prova do torno a cada leitura.

Para determinar a rugosidade superficial, foram analisados os parâmetros de Rugosidade Média (Ra) e de Rugosidade Total (Rt), por melhor se ajustarem aos estudos de acabamento superficial, conforme verificado durante a revisão de literatura. O comprimento de amostragem adotado (*cut-off*) foi de 0,8 mm, conforme indicado pelas normas AISI NBR4287: 2002 e AISI NBR ISO 4288:2008.

Os avanços utilizados foram de 0,05 mm e 0,1 mm, e é a partir desse valor de avanço que as normas mencionadas indicam o *cut-off* a ser adotado em um experimento. O *cut-off* trata-se do valor que relaciona a distância dos sulcos gerados pelo avanço da ferramenta durante a usinagem.

4.6 DESGASTE DAS FERRAMENTAS DE CORTE

Após o processo de usinagem, foram determinados os desgastes e avarias sofridos pelas ferramentas de corte durante o processo. Para isso, foram feitas tanto análises quantitativas dos desgastes, como qualitativas.

Para a análise quantitativa, foi feita a medição do desgaste de flanco com o microscópio de medição da marca Mahr, modelo MarVision MM200 (Figura 27). Para a avaliação qualitativa do tipo de desgaste, foi utilizado um microscópio óptico da marca Zeiss, modelo Stemi2000 (Figura 28). Foram capturadas fotos das superfícies de corte e de saída.

Figura 27 - Microscópio da marca Mahr, modelo MarVision MM 200



Fonte: produção do próprio autor.

Figura 28 - Microscópio da marca Zeiss, modelo Stemi2000



Fonte: produção do próprio autor.

4.7 TIPOS DE CAVACO

A classificação dos tipos de cavacos gerados foi feita de acordo com a sua morfologia, a qual pode ser dividida em cavacos contínuos, descontínuos, parcialmente contínuos ou segmentados. Para classificar as formas dos cavacos, foi utilizada como base a norma ISO 3685:1993, a qual classifica os formatos dos cavacos em fita, helicoidal, espiral ou lascas.

Dessa forma, pode ser feita uma relação das características dos cavacos gerados com os dados obtidos de desgaste, integridade superficial, vibração, emissão acústica e potência consumida.

4.8 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para avaliar o quanto os parâmetros de corte influenciaram no comportamento das variáveis de saída, bem como no desempenho da ferramenta de corte e na formação de cavaco, foram realizadas análises estatísticas de variância (ANOVA) e testes de normalidade de Anderson-Darling.

O *software* utilizado para o tratamento dos dados obtidos foi o MATLAB® R2015b. Uma vez com os dados tratados, foram realizadas as análises estatísticas no MINITAB® e, a partir dessas análises, foi possível verificar a usinabilidade do aço endurecido com os parâmetros e ferramenta de corte escolhidos para o estudo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos em conjunto com a análise estatística das variáveis de saída avaliadas no presente estudo (rugosidade, potência, vibração e emissão acústica) de forma individual, bem como a interação entre elas. Também serão analisados os desgastes das ferramentas e os tipos de cavacos formados durante o processo.

Para análise das variáveis de saída, os resultados serão organizados de forma a aprofundar gradativamente a discussão: inicialmente, serão apresentados os gráficos de efeitos principais para cada variável de entrada separadamente; depois os gráficos de interações de segunda ordem entre os fatores; e só então as tabelas resultantes da análise de variância que validarão estatisticamente as observações feitas nos gráficos, considerando, também, interações de terceira ordem entre os fatores.

A ANOVA é obtida sob a hipótese de que a população seja normal, então para que fosse utilizada a análise de variância, antes de mais nada foi necessário entender se a distribuição dos dados obtidos dessa população era normal, testando hipóteses sobre sua média. Uma vez que foi constatada a normalidade da população através do teste de Kolmogorov – Smirnov, foi possível seguir com a análise estatística.

Ainda sobre a análise de variância, vale ressaltar que foi adotado $\alpha = 5\%$ como nível de significância, o que, na prática, determina que os fatores e suas interações são considerados significativos para a variável de resposta analisada quando Valor-P for menor do que 0,05. Em casos de Valor-F maiores do que 2, a variável possui relevância estatística.

As variáveis analisadas são entendidas como “menor-melhor”: quanto menor o valor absoluto das mesmas, melhor o desempenho do processo de usinagem. De forma resumida, esse estudo busca os menores valores para cada variável estudada.

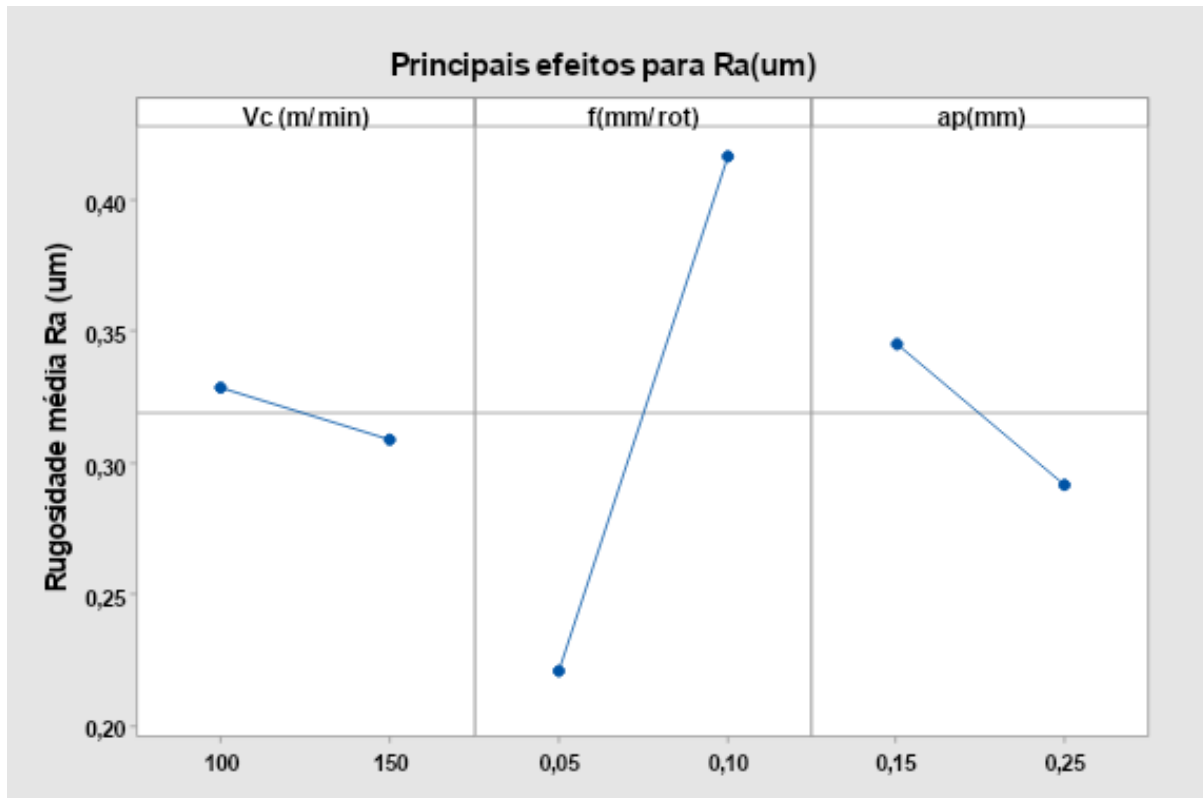
5.1 RUGOSIDADE MÉDIA (Ra)

Em um primeiro momento, analisando-se o gráfico de efeitos principais para rugosidade média, pode-se identificar separadamente a influência de cada variável de entrada do processo. De acordo com a Figura 29, é possível verificar visualmente que a velocidade de corte possui uma menor influência na referida variável de saída.

Ao variar-se o avanço, é notável que este exerce grande influência na qualidade superficial da peça usinada, de modo que, aumentando-se o avanço, pior a qualidade superficial – ou seja, maior é o índice de rugosidade média.

No caso da profundidade de corte, pode-se observar que existe uma influência maior do que se comparado à velocidade de corte, e menor se comparado ao avanço. Assim como a velocidade de corte, conforme aumenta-se o valor da profundidade, melhora-se a qualidade superficial.

Figura 29 - Gráfico de efeitos principais para Ra

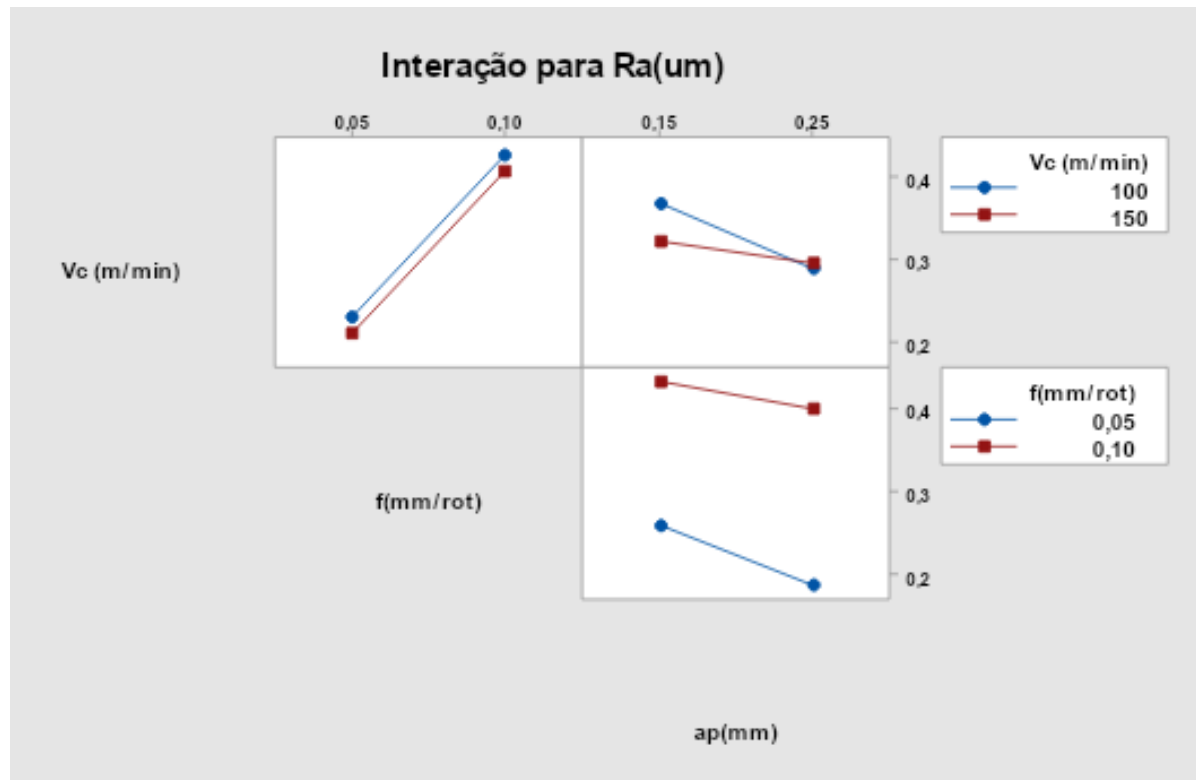


Fonte: produção do próprio autor.

Separadamente, pode-se dizer que os melhores valores de cada fator em termos da variável de saída analisada, seriam: $V_c = 150$ m/min; $f = 0,05$ mm/rot; $a_p = 0,25$ mm.

Para um melhor entendimento acerca das influências das variáveis de entrada do processo de torneamento, também é de suma importância que sejam avaliadas as suas interações e o quanto as mesmas influenciam nas variáveis de saída. A Figura 30 mostra um gráfico comparativo entre as interações de segundo grau presentes no processo.

Figura 30 - Gráfico de interações para Ra



Fonte: produção do próprio autor.

Comparando-se as interações, é possível identificar que a interação entre o avanço e profundidade de corte com valores de 0,05 mm/rot e 0,25 mm, respectivamente, resultam em uma menor rugosidade. Outra interação que apresenta uma rugosidade muito próxima da menor atingida, foi a de velocidade de corte de 150 m/min e de avanço de 0,05 mm/rot, porém pode-se observar que não há interação significativa entre essas variáveis.

É possível identificar visualmente que as interações em que houve uma maior variação na rugosidade foram as interações de avanço com as demais variáveis, velocidade e profundidade de corte.

A partir da Tabela 5 pode ser feito o entendimento com base em análises estatísticas da significância de cada influência das variáveis, bem como identificar interações de terceira ordem entre as mesmas:

Tabela 5 - Análise de variância referente à rugosidade média

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	Valor-P
Modelo	8	0,177006	0,022126	8,68	0,005
Linear	3	0,166389	0,055463	21,75	0,001
Vc (m/min)	1	0,001560	0,001560	0,61	0,460
f(mm/rot)	1	0,153272	0,153272	60,10	0,000
ap(mm)	1	0,011556	0,011556	4,53	0,071
Interações de 2º	3	0,004334	0,001445	0,57	0,654
Vc (m/min)*f(mm/rot)	1	0,000004	0,000004	0,00	0,970
Vc (m/min)*ap(mm)	1	0,002809	0,002809	1,10	0,329
f(mm/rot)*ap(mm)	1	0,001521	0,001521	0,60	0,465
Interações de 3º	1	0,006162	0,006162	2,42	0,164
Vc (m/min)*f(mm/rot)*ap(mm)	1	0,006162	0,006162	2,42	0,164
Erro	7	0,017853	0,002550		
Total	15	0,194859			

Fonte: produção do próprio autor.

Considerando o Valor-P calculado, pode-se inferir que o avanço interferiu significativamente na rugosidade, considerando-se o nível de significância de 0,05, uma vez que o Valor-P desse fator é menor do que o valor de nível de significância. No caso do fator de profundidade de corte, o Valor-F é maior de 2 e, por conta disso, essa variável possui relevância estatística quanto à rugosidade média.

Como pode-se notar, a velocidade de corte foi o fator que menos influenciou na rugosidade média, pois com velocidades de corte mais elevadas, como no presente experimento, a qualidade superficial da peça usinada torna-se menos sensível a alterações dessa variável.

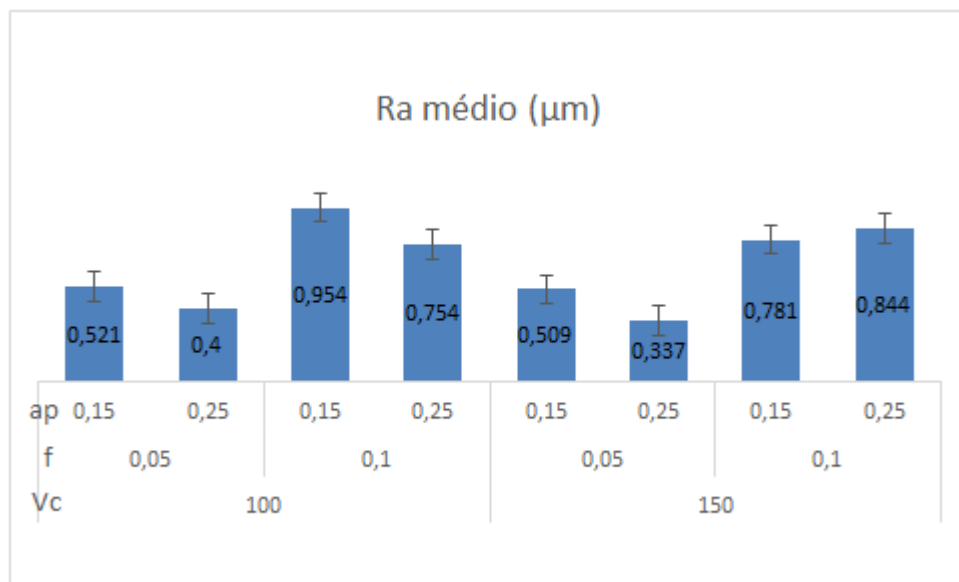
Embora pouco significativo, segundo Machado et al (2011), pode-se explicar a melhoria da qualidade superficial quando submetidas a maiores velocidades de corte, pois evita-se a formação de aresta postiça de corte. Além disso, por conta do aumento da temperatura, tem-se uma menor resistência ao cisalhamento da peça, reduzindo as forças de usinagem.

Ainda segundo Machado et al (2011), o aumento no avanço possui influência significativa na rugosidade, através de efeito geométrico: aumentando-se o avanço, aumenta também a distância entre os picos no perfil de rugosidade, alterando a amplitude da mesma em uma proporção quadrática em relação ao aumento do avanço. Por conta dessa relação quadrática, o avanço se torna um fator geométrico de influência direta. Essa relação ocorre devido ao aumento da área de contato entre o raio de ponta da ferramenta e a superfície

usinada, acarretando aumento de atrito e vibrações que diminuem a qualidade superficial (BONIFÁCIO, 1993).

A Figura 31 mostra os valores médios de Ra obtidos em cada condição de ensaio com as combinações dos parâmetros de corte que foram variados durante o experimento. Dessa forma, pode-se verificar visualmente a influência do avanço que, por exemplo, quando variado de 0,05 para 0,1 mm/rot em velocidade de 150 m/min e profundidade de corte de 0,25 mm, quase triplica o valor de rugosidade média.

Figura 31 – Gráfico de valores médios para Ra, com desvio padrão amostral



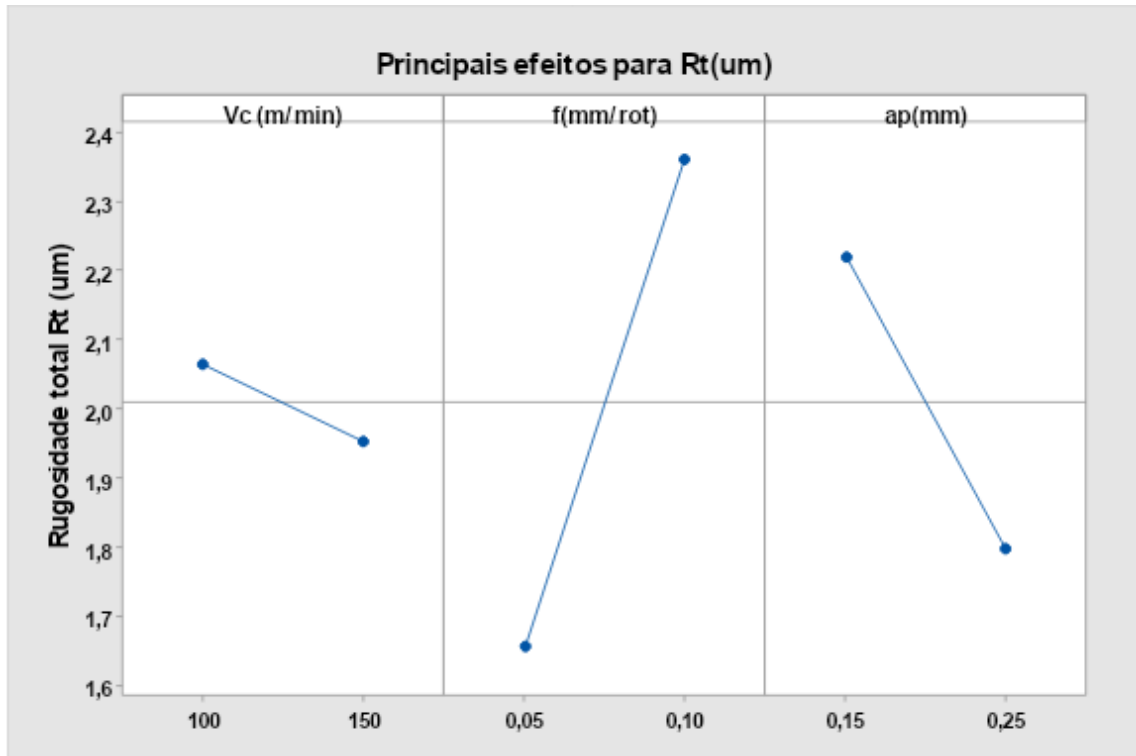
Fonte: produção do próprio autor.

5.2 RUGOSIDADE TOTAL (Rt)

Analisando os principais efeitos para a rugosidade total apresentados no gráfico da Figura 32, de um modo geral, pode-se observar que o comportamento dessa variável de saída foi semelhante ao comportamento da rugosidade média em termos de influência dos parâmetros do processo.

Assim como no resultado visualizado na rugosidade média, pode-se inferir que a melhor combinação de níveis de cada parâmetro no que diz respeito à rugosidade total, são: $V_c = 150$ m/min; $f = 0,05$ mm/rot; e $a_p = 0,25$ mm.

Figura 32 - Gráfico de efeitos principais dos parâmetros de corte para rugosidade total

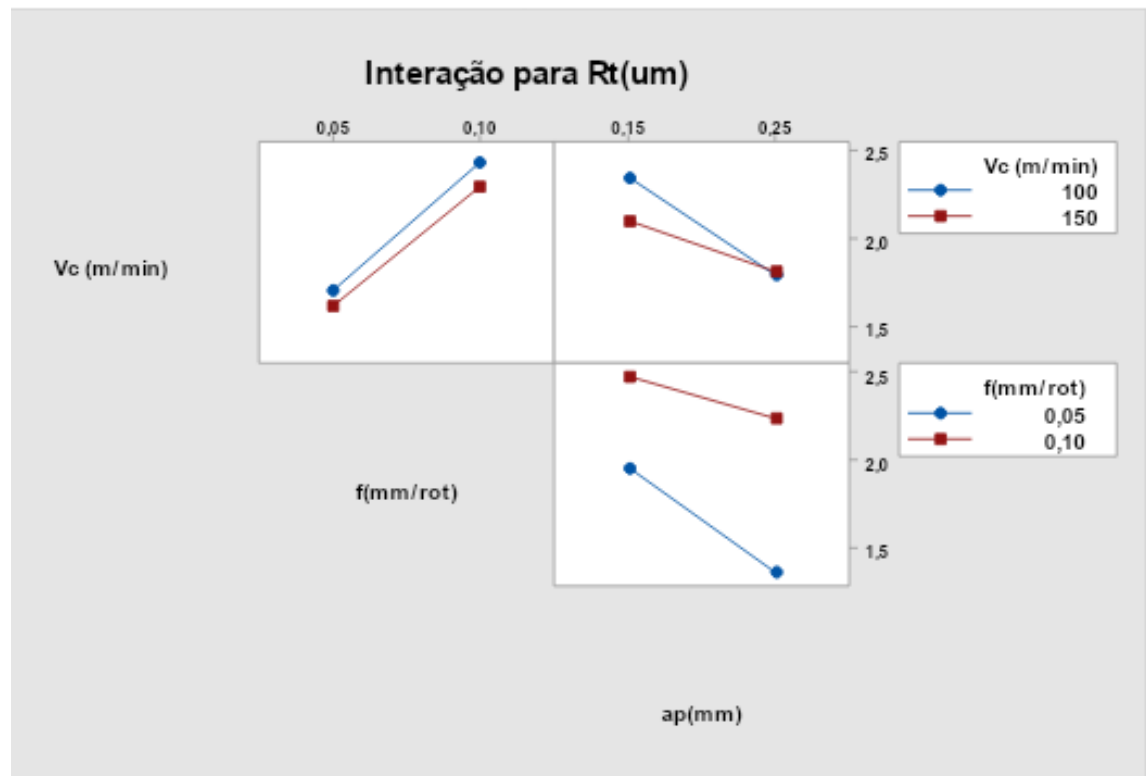


Fonte: produção do próprio autor.

Em termos de profundidade de corte, nota-se no gráfico de efeitos principais que houve uma maior alteração da rugosidade total, conforme variou-se esse parâmetro. Essa diferença pode ser explicada por conta da capacidade de detectar defeitos pontuais em R_t , diferentemente de R_a em que é avaliado o aspecto geral da superfície, através de valores médios de picos e vales.

Os gráficos de interação para rugosidade total (Figura 33) também possuem comportamento muito semelhante com o observado na rugosidade média, em que é possível identificar visualmente uma maior influência das interações de avanço na variável de saída analisada.

Figura 33 - Gráfico de interações para Rt



Fonte: produção do próprio autor.

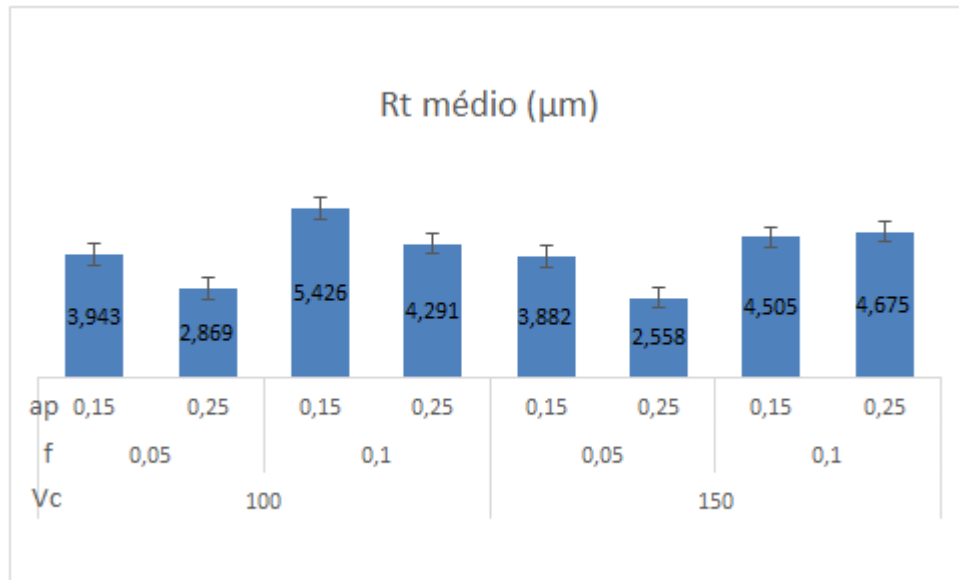
A Tabela 6 e a Figura 34 mostram comportamentos semelhantes ao observado na rugosidade média, o que sugere que não houve um caso isolado de alteração na qualidade superficial que venha a ter sido camuflado durante a análise de rugosidade média, uma vez que a rugosidade total é capaz de capturar eventos pontuais de alteração nos picos de rugosidade.

Tabela 6 - Análise de variância referente à rugosidade total

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	Valor-P
Modelo	8	3,11392	0,38924	4,27	0,036
Linear	3	2,75013	0,91671	10,07	0,006
V_c (m/min)	1	0,05164	0,05164	0,57	0,476
f (mm/rot)	1	1,99163	1,99163	21,87	0,002
ap (mm)	1	0,70686	0,70686	7,76	0,027
Interações de 2º	3	0,19961	0,06654	0,73	0,566
V_c (m/min)* f (mm/rot)	1	0,00170	0,00170	0,02	0,895
V_c (m/min)* ap (mm)	1	0,06956	0,06956	0,76	0,411
f (mm/rot)* ap (mm)	1	0,12834	0,12834	1,41	0,274
Interações de 3º	1	0,15113	0,15113	1,66	0,239
V_c (m/min)* f (mm/rot)* ap (mm)	1	0,15113	0,15113	1,66	0,239
Erro	7	0,63739	0,09106		
Total	15	3,75131			

Fonte: produção do próprio autor.

Figura 34 – Gráfico de valores médios para Rt, com desvio padrão amostral



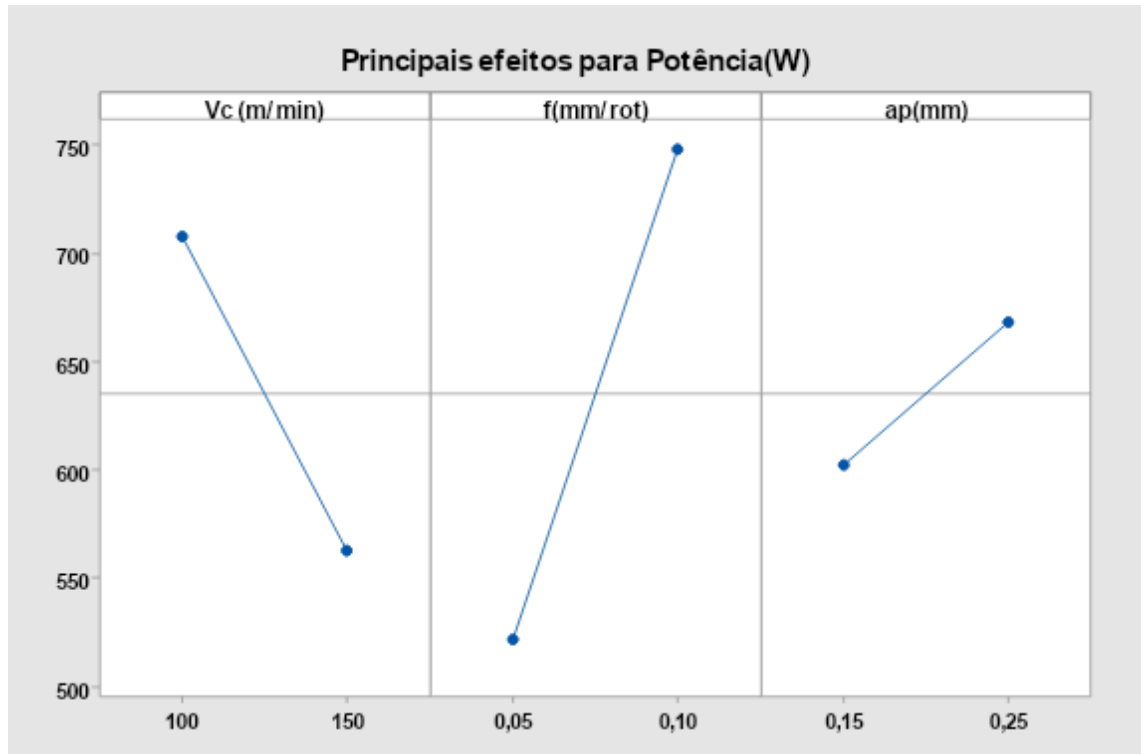
Fonte: produção do próprio autor.

5.3 POTÊNCIA CONSUMIDA

Verificando-se os efeitos principais dos parâmetros de corte para potência (Figura 35), pode-se observar que, de um modo geral, todos os fatores alteram de forma visualmente significativa os valores dessa variável de saída. Ao aumentar-se o avanço e a profundidade de corte, é possível notar que houve um aumento do consumo de potência; já com o aumento da velocidade de corte, há uma redução da potência.

Analisando separadamente os fatores, pode-se verificar que os valores que correspondem a menores valores de potência consumida, são: $V_c = 150$ m/min; $f = 0,05$ mm/rot; e $a_p = 0,15$ mm.

Figura 35 - Gráfico de efeitos principais para potência

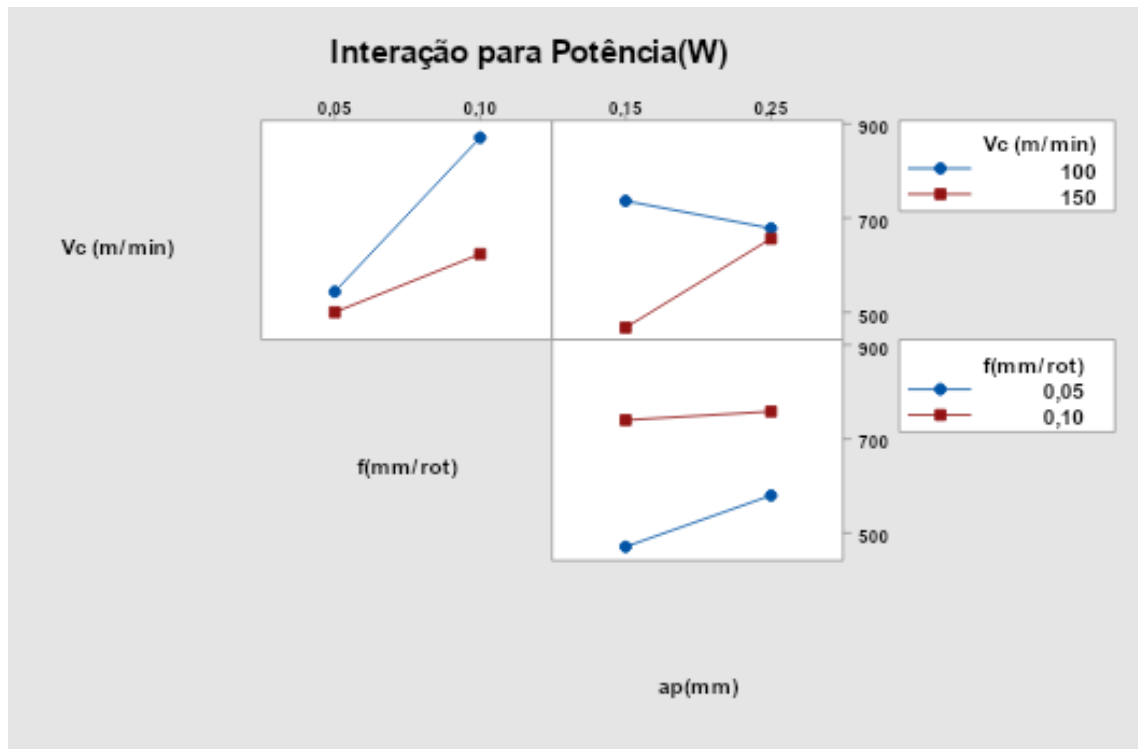


Fonte: produção do próprio autor.

Na Figura 36, pode-se observar que as retas de interações de velocidade x profundidade de corte possuem comportamentos distintos entre si: na velocidade de 100 m/min, ao aumentar a profundidade de corte, nota-se uma redução de aproximadamente 50 W da potência consumida; já quando a usinagem ocorre à velocidade de 150 m/min, aumenta-se a potência de 450 W para 690 W, aproximadamente.

Para as interações de velocidade de corte x avanço e avanço x profundidade de corte, todas as retas possuem comportamento crescente, conforme observado na Figura 36. O que as difere entre si são as inclinações das mesmas: na interação de vc x f, a reta referente ao menor valor de velocidade possui uma maior inclinação do que a reta referente ao maior valor desse fator, e o mesmo comportamento pode ser observado nas inclinações das retas de avanço na interação de f x ap.

Figura 36 - Gráfico de interações dos parâmetros de corte para potência



Fonte: produção do próprio autor.

As análises gráficas podem ser confirmadas estatisticamente, analisando-se a Tabela 7. De acordo com a ANOVA, os fatores velocidade de corte e avanço possuem interferência significativa na variável de saída observada, uma vez que o Valor-P de ambas é menor do que 0,05. A interferência da profundidade de corte possui relevância estatística, embora não interfira significativamente do ponto de vista estatístico na resposta da potência consumida.

Tabela 7 - Análise de variância para potência de corte

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	Valor-P
Modelo	8	435769	54471	6,48	0,012
Linear	3	306989	102330	12,17	0,004
V_c (m/min)	1	84335	84335	10,03	0,016
f (mm/rot)	1	205388	205388	24,43	0,002
ap (mm)	1	17266	17266	2,05	0,195
Interações de 2º	3	111452	37151	4,42	0,048
V_c (m/min)* f (mm/rot)	1	40493	40493	4,82	0,064
V_c (m/min)* ap (mm)	1	62862	62862	7,48	0,029
f (mm/rot)* ap (mm)	1	8097	8097	0,96	0,359
Interações de 3º	1	14714	14714	1,75	0,227
V_c (m/min)* f (mm/rot)* ap (mm)	1	14714	14714	1,75	0,227
Erro	7	58854	8408		
Total	15	494624			

Fonte: produção do próprio autor.

Em termos de interações entre os fatores, somente a interação de velocidade x profundidade de corte possui Valor-P menor do que 0,05, ou seja, influencia estatisticamente dentro do nível de significância adotado de 0,05.

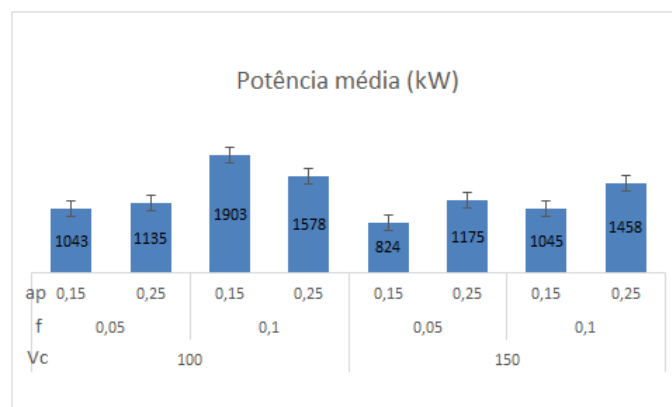
Segundo a literatura, a potência consumida no processo de usinagem está diretamente relacionada com o nível de remoção do material usinado, o que foi comprovado com o presente experimento, uma vez que, conforme observado, para maiores valores de avanço e profundidade de corte, maior a potência. Esse comportamento pode ser explicado pelo aumento da área de contato entre material usinado e ferramenta, área essa que é diretamente proporcional à potência.

A relação entre velocidade de corte e potência consumida é inversamente proporcional, uma vez que, como observado graficamente, ao aumentar-se a velocidade, percebe-se um decréscimo na potência. Esse comportamento pode ser relacionado à menor deformação que ocorre no material submetido a elevadas velocidades, o que diminui a força necessária para remoção do mesmo e, conseqüentemente, a potência consumida no processo.

A potência de corte trata-se da potência necessária na aresta de corte da ferramenta e consumida durante a remoção do material em forma de cavaco. Sendo assim, constata-se que os valores elevados dessa variável de saída que foram obtidos a elevadas profundidades de corte e avanços não são atrativos para o processo produtivo, uma vez que podem gerar custos adicionais.

A Figura 37 mostra a potência média consumida durante cada ensaio, relacionando os três fatores. Conforme pode-se observar, a condição que mais favoreceu em termos de potência, foi a velocidade de corte a 150 m/min, avanço de 0,05 mm/rot e profundidade de corte de 0,15 mm, resultando em uma potência média de 824 kW.

Figura 37 - Gráfico de valores médios para potência de corte, com desvio padrão amostral



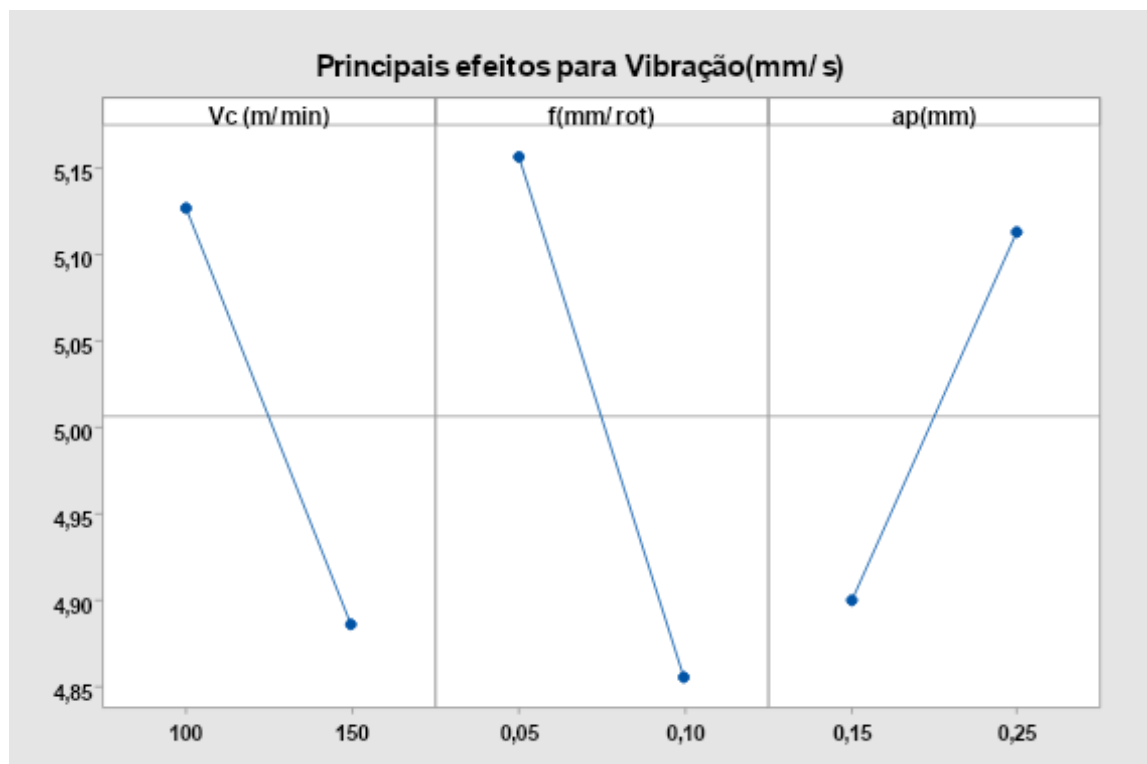
Fonte: produção do próprio autor.

5.4 VIBRAÇÃO

Observando-se a Figura 38, é possível perceber graficamente que a vibração possui comportamento inversamente proporcional à velocidade de corte e ao avanço, com alterações aparentemente significativas ao se aumentar 50 m/min e 0,05 mm/rot, respectivamente. A referida variável de saída possui comportamento diretamente proporcional à profundidade de corte.

Comparando-se à potência, pode-se notar que as retas dos fatores velocidade e profundidade de corte da vibração possuíram comportamentos semelhantes, já o avanço proporcionou uma resposta oposta para a vibração. Os parâmetros que apresentam menores valores de vibração individualmente, são: $V_c = 150$ m/min; $f = 0,10$ mm/rot; e $a_p = 0,15$ mm.

Figura 38 - Gráfico de principais efeitos para vibração

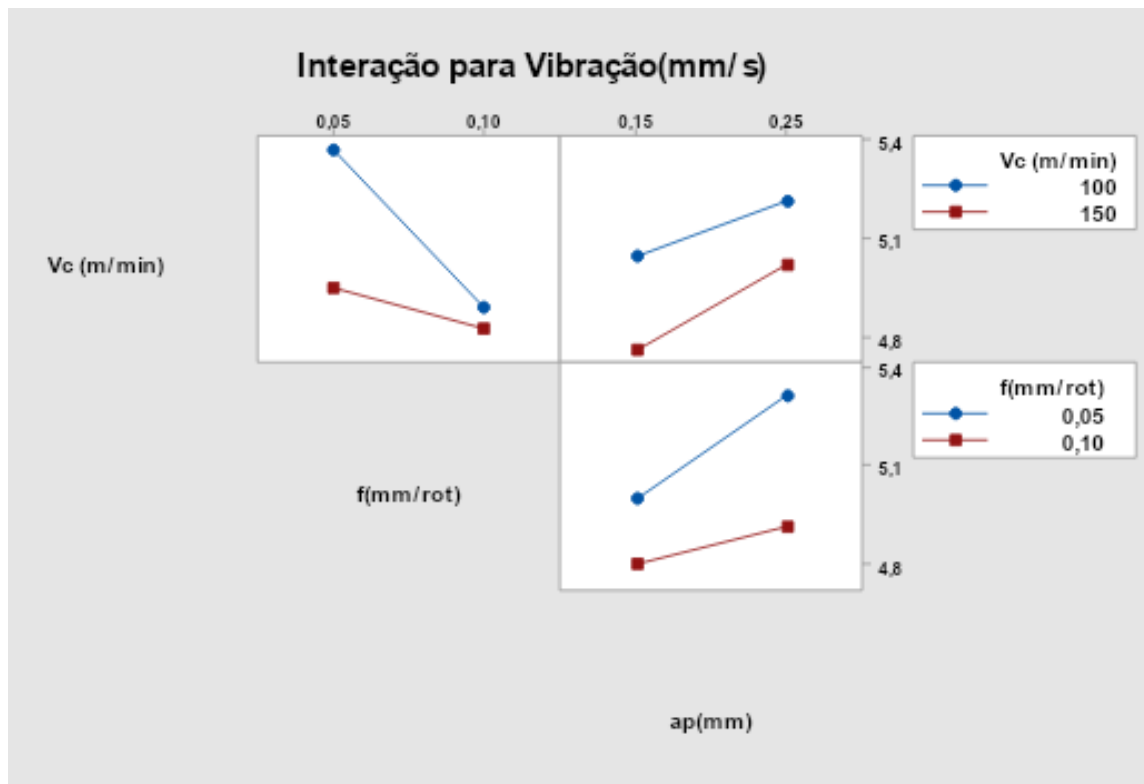


Fonte: produção do próprio autor.

Observando as interações entre os parâmetros de corte (Figura 39), confirma-se o comportamento individual dos mesmos observados no gráfico de efeitos principais: ao aumentar V_c , observa-se que há menores valores de vibração, bem como ao aumentar o avanço. O inverso é observado ao analisar a profundidade de corte.

Na interação de $V_c \times f$ é possível verificar que, à velocidade de 100 m/min, um aumento em 0,05 mm/rot no avanço proporcionou uma queda brusca na variável de saída, se comparado à velocidade de 150 m/min. Para as demais interações, a diferenciação entre as inclinações das retas foi menos acentuada.

Figura 39 - Gráfico de interação para vibração



Fonte: produção do próprio autor.

A Tabela 8 reafirma do ponto de vista estatístico o que já foi possível identificar visualmente nos gráficos anteriores: todos os fatores, individualmente, tiveram influência significativa em termos de vibração. O avanço possui Valor-P de 0,010, menor valor observado dentre os parâmetros, portanto pode-se concluir que é o fator que possui maior significância, conforme observado previamente.

Tabela 8 - Análise de variância de vibração

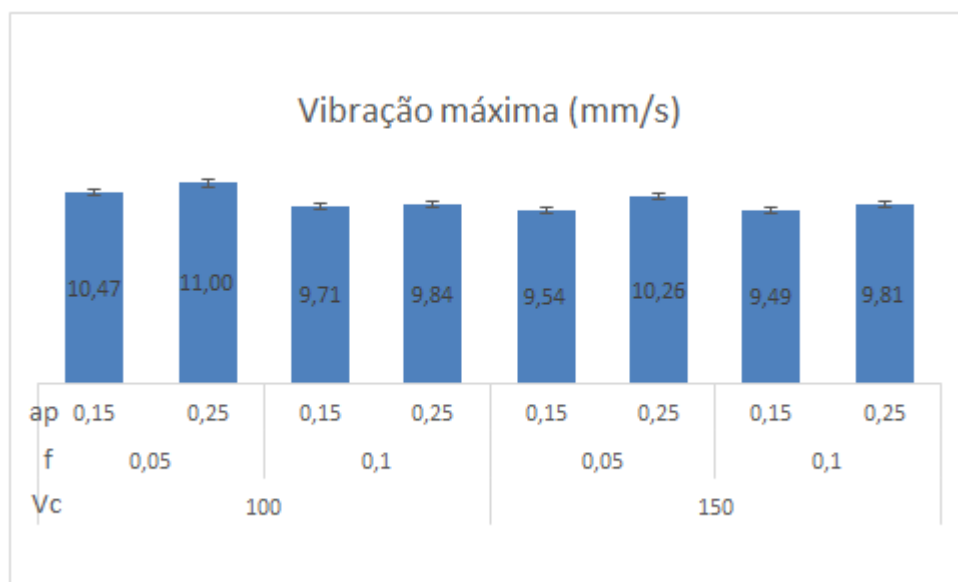
Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	Valor-P
Modelo	8	0,95533	0,119417	4,05	0,041
Linear	3	0,77629	0,258764	8,77	0,009
Vc (m/min)	1	0,23088	0,23088	7,82	0,027
f(mm/rot)	1	0,36283	0,362826	12,29	0,010
ap(mm)	1	0,18259	0,182585	6,19	0,042
Interações de 2º	3	0,17442	0,058141	1,97	0,207
Vc (m/min)*f(mm/rot)	1	0,12638	0,12638	4,28	0,077
Vc (m/min)*ap(mm)	1	0,00836	0,008363	0,28	0,611
f(mm/rot)*ap(mm)	1	0,03968	0,039681	1,34	0,284
Interações de 3º	1	0,00000	0,000001	0,00	0,997
Vc (m/min)*f(mm/rot)*ap(mm)	1	0,00000	0,000001	0,00	0,997
Erro	7	0,20663	0,029519		
Total	15	1,16196			

Fonte: produção do próprio autor.

Dentre as interações, somente a interação de Vc x f possui relevância estatística, com Valor-F de 4,28 e Valor-P relativamente próximo ao grau de significância adotado de 0,05.

A Figura 40 mostra a variação das médias de vibração máxima em cada ensaio. O comportamento observado nesse gráfico é de pouca variação entre as diferentes interações dos três fatores. Esse comportamento já era esperado, uma vez que não houve percepção na análise de variância de que a interação de terceiro grau fosse significativa.

Figura 40 - Gráfico de valores médios para vibração, com desvio padrão amostral



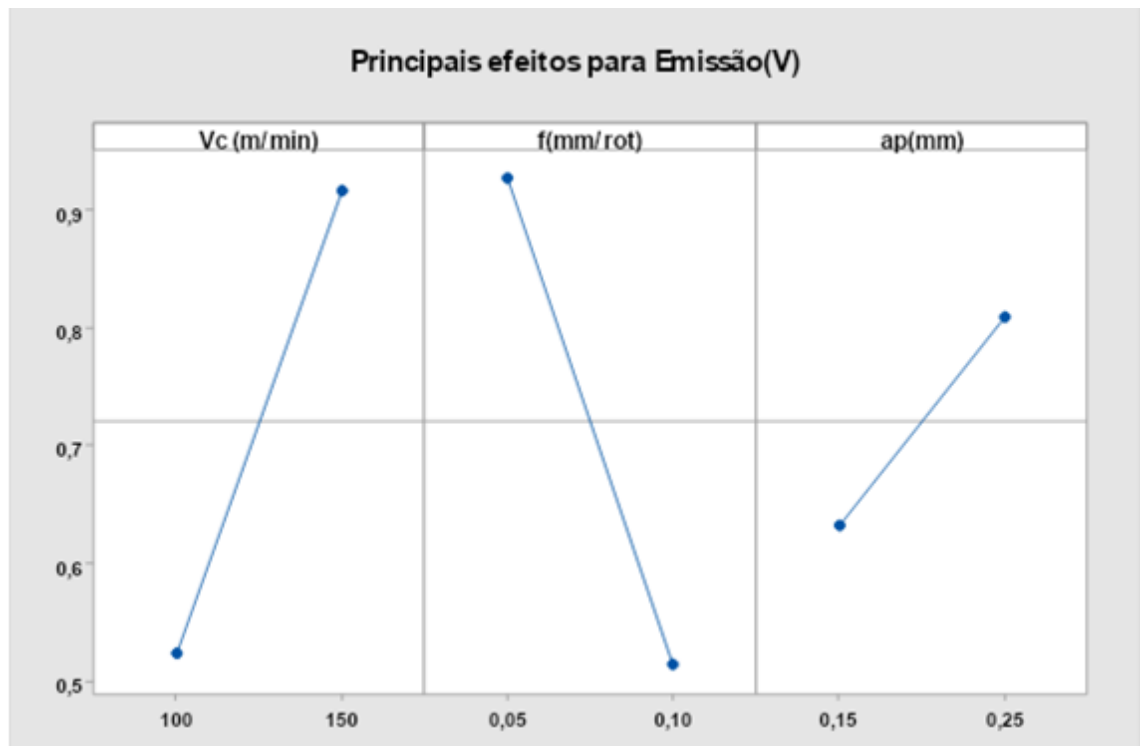
Fonte: produção do próprio autor.

5.5 EMISSÃO ACÚSTICA

Avaliando o gráfico de principais efeitos para emissão acústica (Figura 41), pode-se observar que ao variar os três parâmetros considerados no processo de usinagem individualmente, a velocidade de corte e o avanço contribuem de forma mais intensa na percepção dessa variável de saída. Aumentando-se 50 m/min da velocidade, a emissão acústica aumenta em aproximadamente 45%; já ao aumentar 0,05 mm/rot do avanço, percebe-se uma redução dessa mesma proporção.

Essa análise inicial nos apresenta os parâmetros $V_c = 100$ m/min; $f = 0,10$ mm/rot; e $a_p = 0,15$ mm como melhores opções em termos de minimização da emissão acústica.

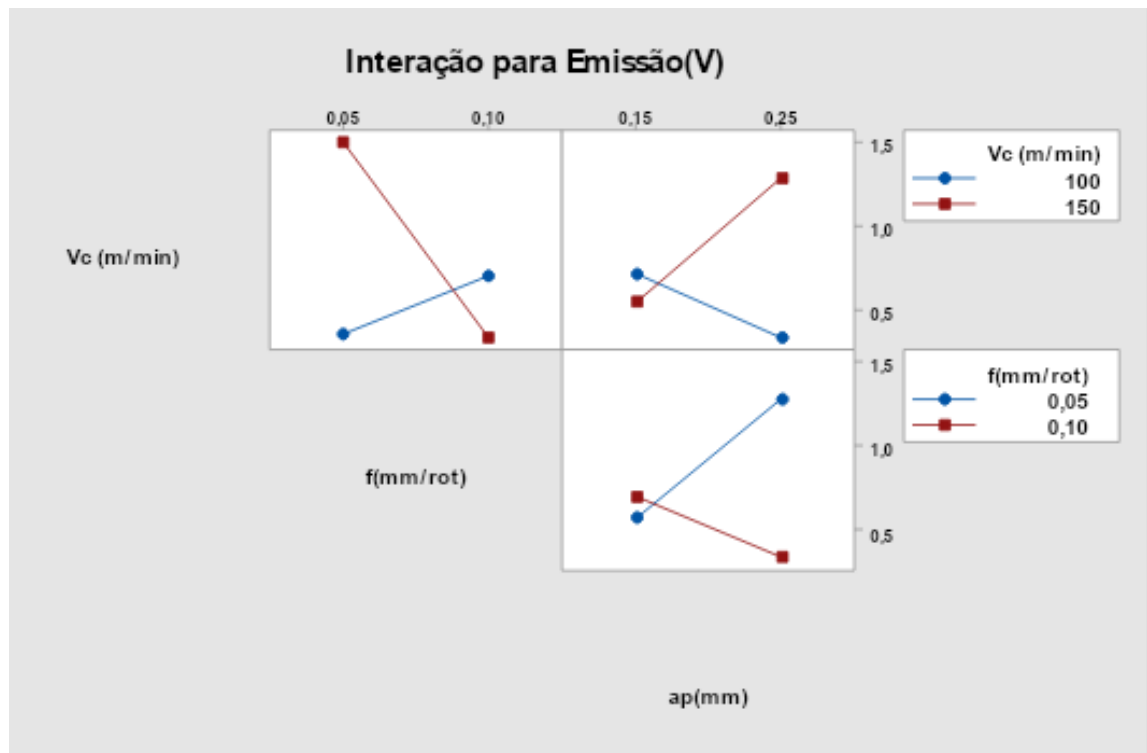
Figura 41 - Gráficos de principais efeitos para emissão acústica



Fonte: produção do próprio autor.

O gráfico de interação (Figura 42) dos dois parâmetros visualmente mais significativos individualmente conforme visto na Figura 41, V_c e f , mostra que foi obtido um valor de emissão acústica semelhante para os valores de velocidade de corte e avanço mais elevados, assim como para valores mais baixos desses mesmos parâmetros. Ou seja, mais importante do que aumentar ou diminuir cada um desses parâmetros individualmente, é que essa variação seja aplicada a ambos: trabalhar com a velocidade mais rápida em conjunto com o maior avanço; ou em uma velocidade reduzida com um menor avanço.

Figura 42 - Gráfico de interação entre os fatores para emissão acústica



Fonte: produção do próprio autor.

Ao observar as demais interações de segundo grau, é possível visualizar uma certa convergência em termos de valores de emissão acústica com as seguintes combinações: $V_c = 100$ m/min, $a_p = 0,15$ mm; e $V_c = 150$ m/min, $a_p = 0,15$ mm. A interação $f \times a_p$ obteve as melhores respostas com as seguintes combinações: $f = 0,05$ mm/rot, $a_p = 0,15$ mm; e $f = 0,10$, $a_p = 0,15$ mm.

Essas comparações mostram que, ao variar-se a profundidade de corte, há uma maior variação na resposta de emissão acústica do que ao variar-se o avanço. Este comportamento não vai de encontro se compararmos ao gráfico de efeitos principais e também se observarmos os resultados da Tabela 9.

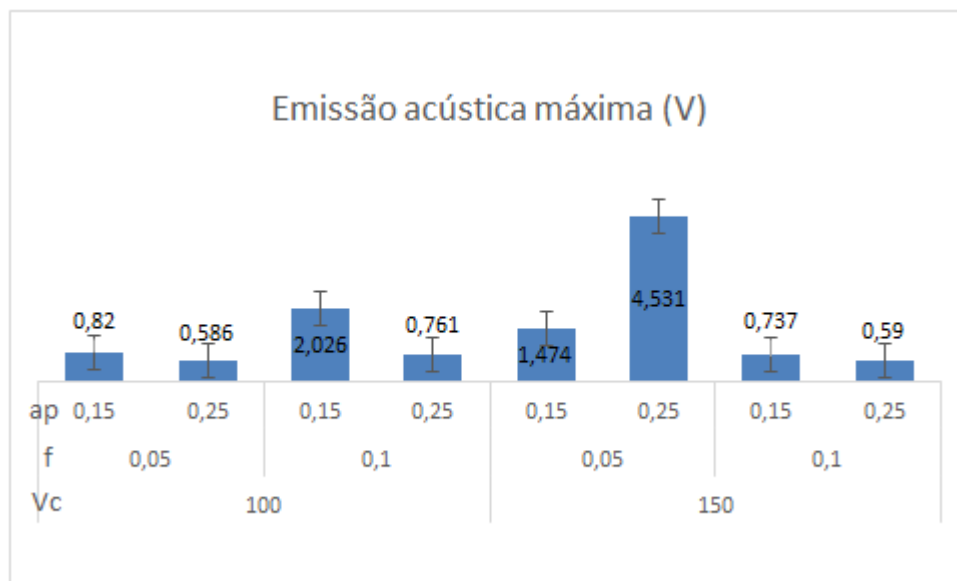
Tabela 9 - Análise de variância para emissão acústica

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	Valor-P
Modelo	8	7,1646	0,8956	1,00	0,509
Linear	3	1,4197	0,4732	0,53	0,678
Vc (m/min)	1	0,6158	0,6158	0,69	0,435
f(mm/rot)	1	0,6794	0,6794	0,76	0,413
ap(mm)	1	0,1244	0,1244	0,14	0,721
Interações de 2º	3	4,6304	1,5435	1,72	0,250
Vc (m/min)*f(mm/rot)	1	2,2945	2,2945	2,55	0,154
Vc (m/min)*ap(mm)	1	1,2150	1,215	1,35	0,283
f(mm/rot)*ap(mm)	1	1,1210	1,121	1,25	0,301
Interações de 3º	1	0,2951	0,2951	0,33	0,585
Vc (m/min)*f(mm/rot)*ap(mm)	1	0,2951	0,2951	0,33	0,585
Erro	7	6,2925	0,8989		
Total	15	13,4571			

Fonte: produção do próprio autor.

O valor médio de emissão acústica máxima de 4,531 V (Figura 43) apresentado para $V_c = 150$ m/min; $f = 0,05$ mm/rot e $a_p = 0,25$ mm mostra que esse foi o ensaio que apresentou a variável em questão mais destoante se comparado às demais combinações de fatores. Uma hipótese para esse fato pode ser a quebra da ponta da ferramenta que será mostrada no próximo tópico.

Figura 43 - Gráfico das médias de emissão acústica máxima a cada repetição do experimento



Fonte: produção do próprio autor.

5.6 DESGASTE DA FERRAMENTA DE CORTE

Um dos aspectos mais importantes para validação dos processos de usinagem é a vida útil da ferramenta de corte utilizada, uma vez que a retirada de material e atritos que ocorrem durante o processo ocasionam alterações progressivas na geometria da mesma. Essas alterações podem ser observadas pela presença de desgastes progressivos nas superfícies de folga e de saída da ferramenta. Nesta seção, serão avaliados quantitativa e qualitativamente os principais desgastes e avarias identificados nas ferramentas de metal duro revestidas após os ensaios.

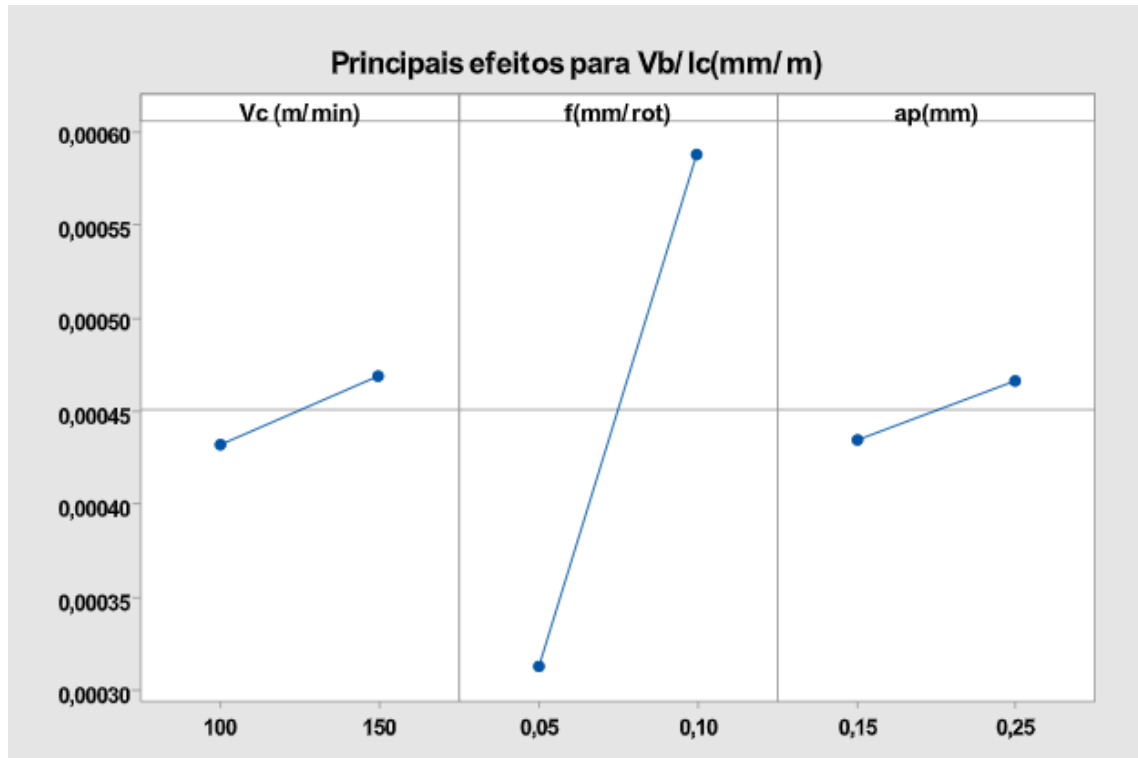
Geralmente, o principal tipo de desgaste que limita a vida útil de uma ferramenta de corte utilizada no processo de torneamento é o desgaste de flanco. Esse tipo de desgaste ocorre em todos os processos de usinagem, por conta disso, é muito importante entender o seu comportamento conforme varia-se os parâmetros de corte.

Para a análise do desgaste de flanco de cada ensaio, é de suma importância que se considere a amplitude do desgaste máximo por metro usinado (V_b/m), e não somente a amplitude do desgaste, pois os valores de avanço maiores possuem menores comprimentos de corte. A divisão do valor do desgaste medido por metro usinado serve justamente para que essa diferenciação de comprimentos de corte não interfira na avaliação quantitativa do desgaste.

Em uma análise inicial, a Figura 44 mostra que, dentre os três fatores, o avanço é o que mais interfere nas medidas de desgaste de flanco por metro usinado. Se analisados individualmente, é perceptível que, para todos os fatores observados, há uma relação diretamente proporcional com o desgaste medido: ou seja, com o aumento de cada fator, há um aumento de V_b/m medido.

Uma explicação plausível para o aumento do desgaste de flanco é o maior atrito que ocorre entre a ferramenta de corte e a peça usinada, conforme é perdido o ângulo de folga da ferramenta. Essa diminuição do ângulo de folga amplia a área de contato entre a ferramenta e a peça, aumentando, assim, o atrito resultante.

Figura 44 - Gráfico de principais efeitos para desgaste de flanco por metro usinado

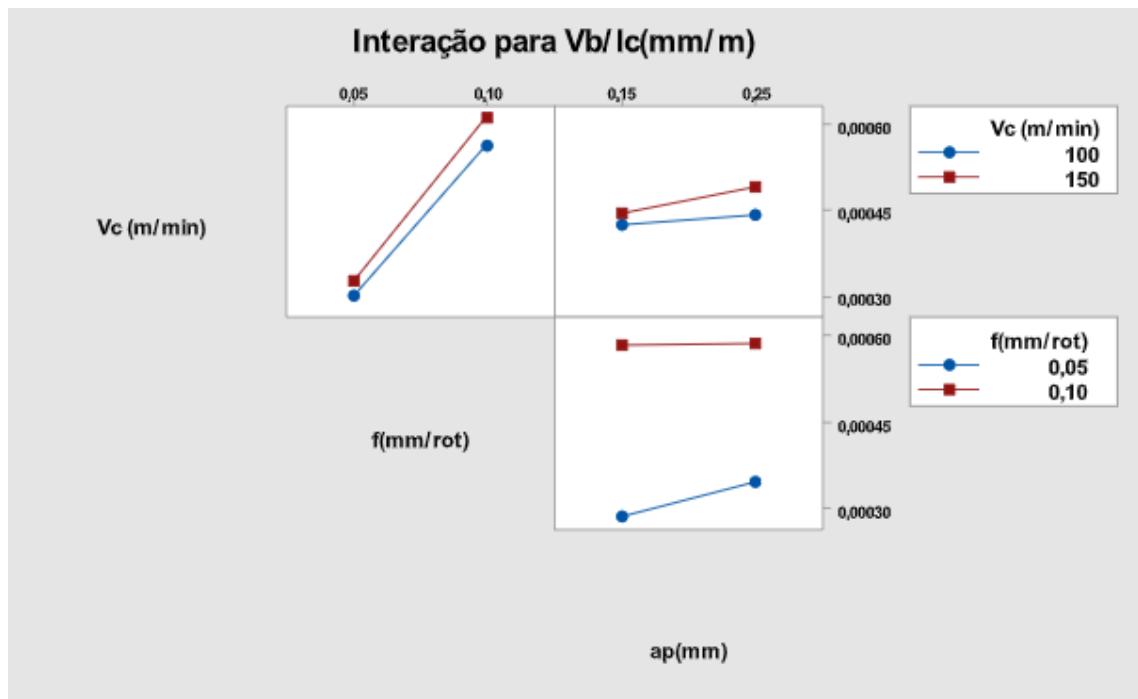


Fonte: produção do próprio autor.

Analisando o gráfico de interações para Vb/m (Figura 45), é possível confirmar a percepção de maior influência do avanço, se comparado com os demais fatores. Na interação de Vc x f, nota-se que o aumento de velocidade pouco influenciou no valor do desgaste, já a variação nos valores de avanço de 0,05 mm/rot e 0,10 mm/rot obteve intenso aumento na medida do desgaste de flanco por metro usinado.

Houve um comportamento semelhante ao observar-se a interação ap x f, em que para o valor de avanço de 0,05 mm/rot foi visualmente imperceptível qualquer alteração em Vb/m ao variar-se a profundidade de corte, já no momento em que variou-se o avanço, foi notável uma grande influência na resposta obtida. No geral, a interação Vc x ap apresentou, graficamente, um comportamento menos interferente em termos de variação de Vb/m.

Figura 45 - Gráfico de interação entre os fatores para o desgaste de flanco por metro usinado



Fonte: produção do próprio autor.

Ao aplicar a análise de variância para a referida variável de saída do processo (Tabela 10), pode-se notar que somente o fator de avanço individualmente possui interferência significativa em sua resposta dentro do grau de significância de 0,05, uma vez que o Valor-P desse fator é de 0,002.

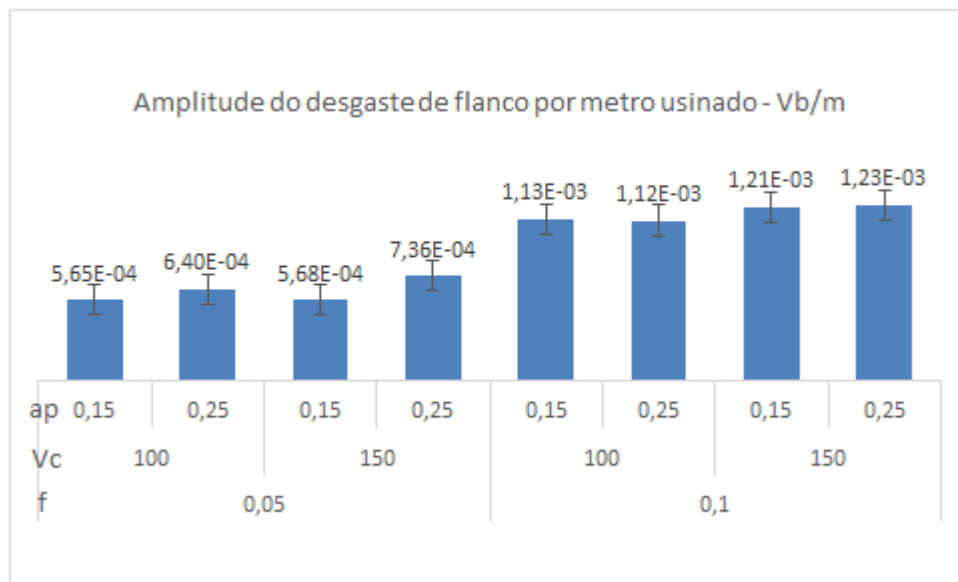
Tabela 10 - Análise de variância referente ao desgaste de flanco por metro usinado

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	Valor-P
Modelo	8	0,00000	0,00000	3,22	0,070
Linear	3	0,00000	0,00000	8,37	0,010
V_c (m/min)	1	0,00000	0,00000	0,44	0,530
f (mm/rot)	1	0,00000	0,00000	24,36	0,002
ap (mm)	1	0,00000	0,00000	0,33	0,585
Interações de 2º	3	0,00000	0,00000	0,13	0,939
V_c (m/min)* f (mm/rot)	1	0,00000	0,00000	0,05	0,835
V_c (m/min)* ap (mm)	1	0,00000	0,00000	0,07	0,799
f (mm/rot)* ap (mm)	1	0,00000	0,00000	0,27	0,618
Interações de 3º	1	0,00000	0,00000	0,02	0,884
V_c (m/min)* f (mm/rot)* ap (mm)	1	0,00000	0,00000	0,02	0,884
Erro	7	0,00000	0,00000		
Total	15	0,00000	0,00000		

Fonte: produção do próprio autor.

A Figura 46 exemplifica visualmente que a variação do parâmetro de avanço é o que mais influencia na média do desgaste de flanco por metro usinado a cada ensaio. Conforme aumenta-se o avanço de 0,05 mm/rot para 0,10 mm/rot, é perceptível aumento da sua ordem de grandeza de 10^{-4} para 10^{-3} . Já variando-se os parâmetros velocidade e profundidade de corte, a variação do desgaste de flanco é menos perceptível.

Figura 46 - Gráfico de desgaste por metro usinado para cada condição de ensaio

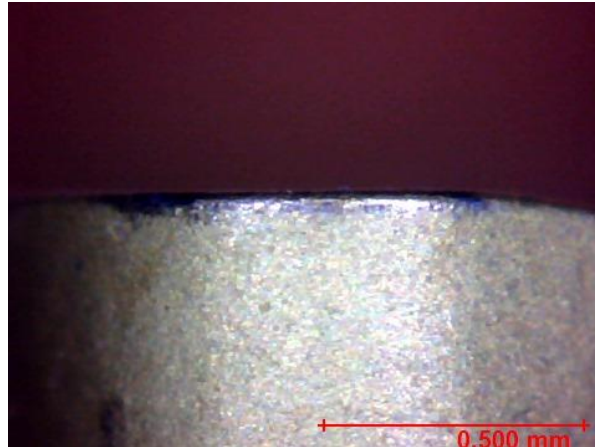


Fonte: produção do próprio autor.

Nos ensaios 1 ($V_c=100$; $f=0,05$; $a_p=0,15$), 2 ($V_c=100$; $f=0,05$; $a_p=0,25$), 3 ($V_c=100$; $f=0,10$; $a_p=0,15$), 9 ($V_c=100$; $f=0,05$; $a_p=0,15$), 10 ($V_c=100$; $f=0,05$; $a_p=0,25$), 11 ($V_c=100$; $f=0,10$; $a_p=0,15$), 13 ($V_c=150$; $f=0,05$; $a_p=0,15$), em que somente um dos parâmetros encontrava-se na maior condição, houve somente a percepção do desgaste de flanco, sem a presença de desgastes abrasivos, conforme observado na Figura 47 que exemplifica somente um dos ensaios, uma vez que os mesmos obtiveram imagens muito semelhantes.

Uma possível explicação para os menores valores de desgaste de flanco, bem como a ausência de desgastes abrasivos nesses ensaios, é a menor taxa de remoção de material devido a valores mais baixos dos parâmetros.

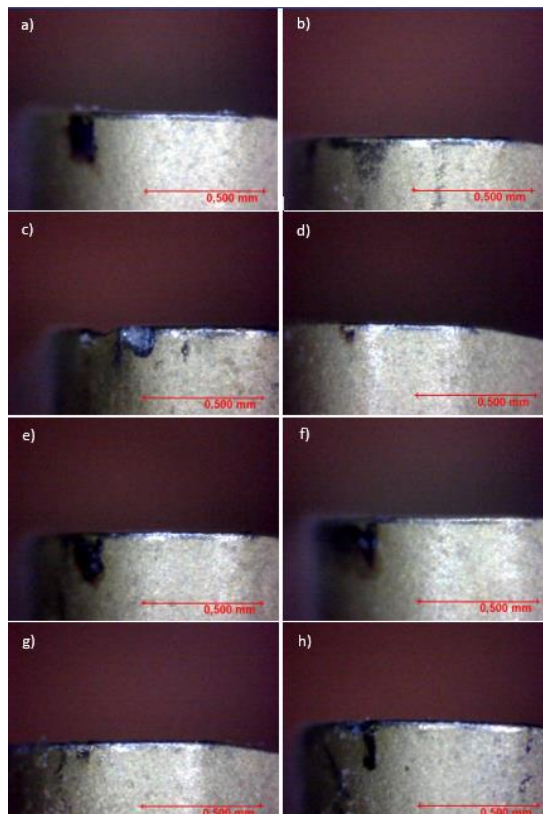
Figura 47 - Desgaste observado no ensaio 1 ($V_c=100$; $f=0,05$; $a_p=0,15$)



Fonte: produção do próprio autor.

Nos ensaios 4, 5, 6, 7, 8, 12, 15 e 16, em que mais de um fator foi definido na maior condição, houve também desgastes abrasivos, conforme observado na Figura 48.

Figura 48 - Desgastes observados nos ensaios a) 4: ($V_c=100$; $f=0,10$; $a_p=0,25$); b) 5: ($V_c=150$; $f=0,05$; $a_p=0,15$); c) 6: ($V_c=150$; $f=0,05$; $a_p=0,25$); d) 7: ($V_c=150$; $f=0,10$; $a_p=0,15$); e) 8: ($V_c=150$; $f=0,10$; $a_p=0,25$); f) 12 ($V_c=100$; $f=0,10$; $a_p=0,25$); g) 15: ($V_c=150$; $f=0,10$; $a_p=0,15$); h) 16 ($V_c=150$; $f=0,10$; $a_p=0,25$)



Fonte: produção do próprio autor.

No caso do ensaio 6, em que a velocidade e a profundidade de corte foram definidas em seus valores mais elevados, 150 m/min e 0,25 mm respectivamente, pode-se observar até mesmo ruptura de parte da ferramenta de corte. Ao comparar-se com as demais variáveis de saída, essa combinação de parâmetros de fato mostrou-se menos atrativa em termos de emissão acústica e de vibração.

Os valores mais elevados de emissão acústica e vibração podem ser atribuídos justamente a esse desgaste abrasivo observado na ferramenta. De um modo geral, pode-se inferir que para evitar o desgaste excessivo da ferramenta de corte e, conseqüentemente, obter melhores valores de emissão acústica e vibração, é indicado que se controle a remoção do material balanceando os valores entre os parâmetros. Um exemplo nesse caso, poderia ser a diminuição da velocidade de corte, ou da sua profundidade.

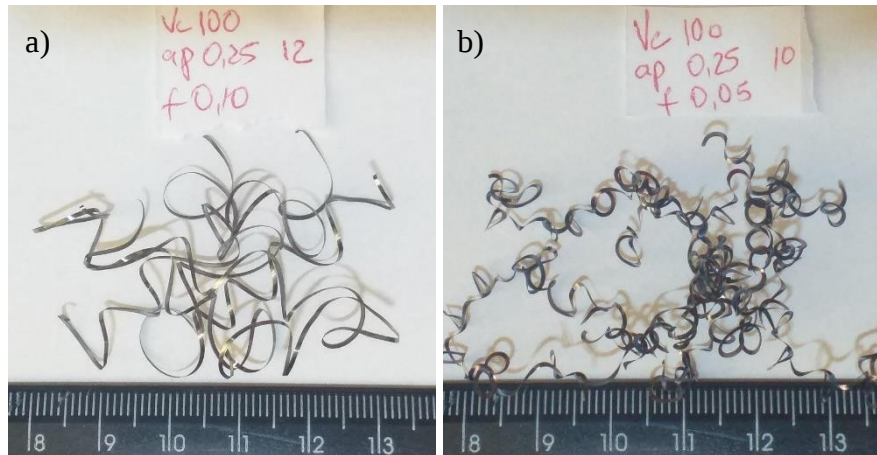
5.7 CAVACOS

O estudo da formação de cavaco é de extrema importância, uma vez que, conforme já exposto na revisão bibliográfica do presente trabalho, o mesmo influencia diversos fatores e variáveis de saída do processo de usinagem, tais como esforços de corte, calor gerado e desgaste da ferramenta. Essas influências representam impactos na qualidade superficial da peça usinada, na segurança do operador e também em aspectos econômicos.

É de conhecimento que, no processo de torneamento de aços endurecidos, há elevadas tensões de compressão por conta do esforço empregado da ponta da ferramenta contra a superfície usinada. São justamente as elevadas tensões de compressão características desse processo que auxiliam na deformação plástica e cisalhamento da superfície da peça.

No geral, as formas de cavaco observadas foram classificadas como tubular emaranhado, a qual é caracterizada como um meio termo entre fita emaranhada e helicoidal do tipo arruela emaranhada. O avanço foi o fator que teve maior influência, visualmente, na forma dos cavacos, conforme pode ser observado na Figura 49:

Figura 49 - Cavacos para ensaios variando somente f



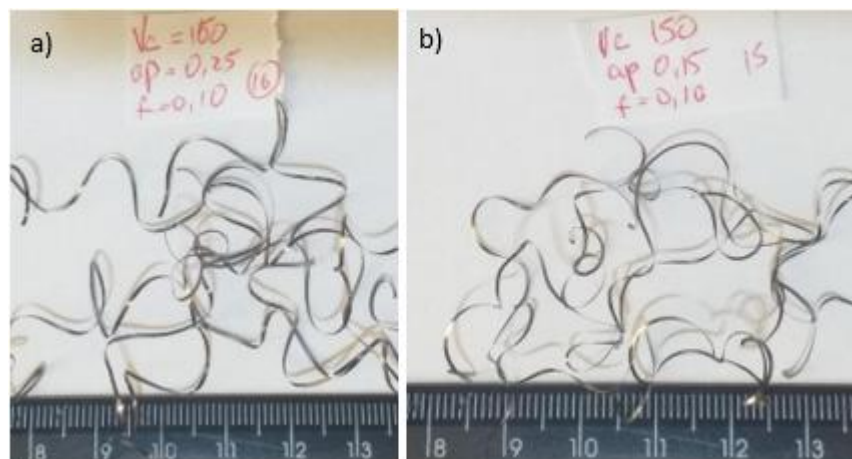
Fonte: produção do próprio autor.

No exemplo mostrado, foi possível observar que, com o aumento do avanço, houve uma menor curvatura do cavaco formado. Essa característica propicia a formação de cavacos contínuos, com maior dificuldade de quebra, podendo ser uma das explicações para a piora da qualidade superficial quando o processo de usinagem foi submetido a maiores valores de avanço.

Abaixo, são mostrados comparativos variando-se a velocidade e profundidade de corte (Figura 50 e 51), em que é possível perceber que houve uma menor influência desses parâmetros na forma do cavaco:

- Variando a_p :

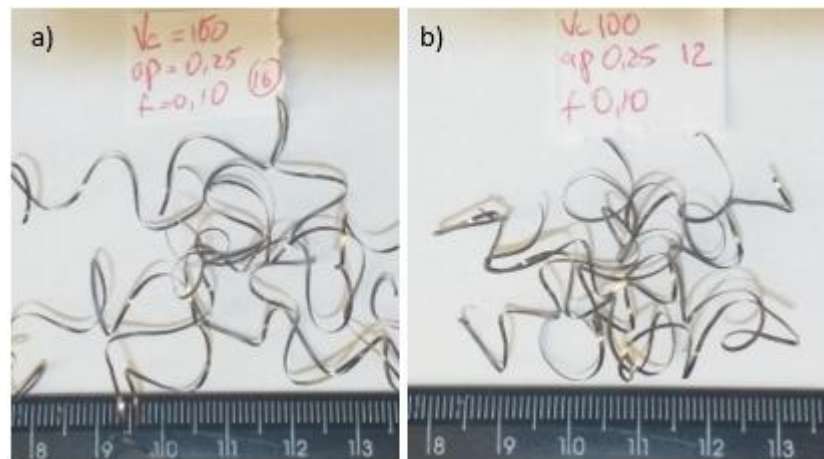
Figura 50 - Cavacos para ensaios variando somente a_p



Fonte: produção do próprio autor.

- Variando V_c :

Figura 51 - Cavacos para ensaios variando somente V_c



Fonte: produção do próprio autor.

O comportamento esperado ao variar V_c seria de mudança na curvatura do cavaco: para maiores valores de V_c , existe uma menor deformação do material, com isso o cavaco formado possui uma menor curvatura e maior dificuldade em quebrar, o que é maléfico para o processo de usinagem. Provavelmente se a variação da velocidade do presente estudo fosse mais elevada, seria perceptível essa diferença entre as formas dos cavacos formados.

Já no caso da profundidade de corte, esse fator não favorece a quebra do cavaco, sendo responsável somente pela espessura do mesmo.

6 CONCLUSÃO

A partir do exposto, bem como através da análise dos resultados significativos do processo de torneamento do aço AISI 4340 e das variáveis de saída (rugosidade, potência consumida, vibração e emissão acústica), além do desgaste da ferramenta de corte, é possível concluir que:

- Todos os ensaios realizados obtiveram valores de rugosidade média dentro do intervalo de rugosidade requerido para o processo de retificação ($0,2 \mu\text{m} < R_a < 1,6 \mu\text{m}$), validando a usinagem do aço endurecido como alternativa econômica e qualitativamente viável ao processo de retificação.

- Em termos de resultados de rugosidade, o avanço foi o fator com maior influência. Neste caso, sob menores valores de avanço, melhor foi o resultado da qualidade superficial da peça usinada, uma vez que os menores valores de rugosidade foram obtidos a um avanço de $0,05 \text{ mm/rot}$. A melhor condição de cada parâmetro para rugosidade, é: $V_c = 150 \text{ m/min}$; $f = 0,05 \text{ mm/rot}$; $a_p = 0,25 \text{ mm}$.

- Houve grande influência do fator avanço para a resposta da potência consumida durante os ensaios. Conforme aumentou-se $0,05 \text{ mm/rot}$ do avanço, foi percebido um aumento de mais de 200 W na potência. Embora o aumento do avanço proporcione a diminuição da pressão específica e, conseqüentemente, da força de corte, ele também proporciona o aumento da área de seção de corte. Esta área exerce maior influência na força de corte e, conseqüentemente, na potência.

- Outro fator relevante para a potência consumida, foi a velocidade de corte: com comportamento inverso ao do avanço, ao aumentar-se a velocidade houve uma diminuição da potência consumida, o que pode ser explicado por conta de maiores temperaturas do processo que diminuem a pressão específica de corte (KS), também interferindo na força aplicada no processo.

- De um modo geral, a emissão não audível diminui em condições mais suaves de usinagem (menores valores de avanço e profundidade de corte). Porém, no caso do presente estudo, houve uma drástica diminuição da emissão acústica quando os ensaios foram submetidos a maiores avanços. Isso pode ser explicado por conta dos cavacos formados, uma vez que os mesmos tiveram maior dificuldade de quebra a menores valores de avanço, resultando em uma maior emissão acústica.

- Devido ao processo ter sido realizado sem fluído de corte, e por conta do material da peça usinada ser de metal duro, foram geradas elevadas temperaturas e pressões de corte,

influenciando, assim, o comportamento e vida útil da ferramenta de corte. Ao se combinar os menores valores de parâmetros de usinagem, houve um melhor desempenho da ferramenta de corte, com menores valores de desgaste de flanco por metro usinado, além de ausência de avarias e desgastes abrasivos.

- Nos ensaios em que o processo foi submetido a maiores valores de remoção de material, ou seja, maiores valores para pelo menos dois dos três parâmetros, foi perceptível através das imagens microscópicas das ferramentas de corte que houve maiores desgastes, chegando até mesmo à quebra da aresta em alguns casos.

- Comparando-se cada variável de saída e suas respectivas respostas às variações dos parâmetros, pode-se concluir que o fator que mais foi significativo em cada variável foi o avanço. Exceto para a emissão acústica, em que nenhum dos parâmetros teve significância estatística e para a vibração, todas as outras variáveis tiveram melhores respostas quando submetidas a menores valores de avanço ($f=0,05$ mm/rot).

- A velocidade de corte de 150 m/min foi favorável para melhor qualidade superficial, potência consumida e vibração. Nas variáveis emissão acústica e desgaste de flanco, o melhor valor de velocidade de corte foi de 100 m/min, porém o mesmo não representou significância na análise estatística, podendo-se adotar o valor de 150 m/min como melhor opção do parâmetro de velocidade de corte.

- Em termos de profundidade de corte, ao combinar-se com os valores de avanço, houve significância nos resultados de rugosidade. Neste caso, a melhor condição de profundidade de corte observada foi de 0,25 mm, o qual representa o maior valor do estudo. Isso pode ser explicado por conta dos menores picos e vales formados durante a usinagem quando a ferramenta de corte penetra mais na peça usinada.

Deste modo, é possível afirmar que os objetivos do trabalho foram atingidos, por conta da coerência dos ensaios realizados ao analisar-se estudos bibliográficos, o que valida a pesquisa no que diz respeito à compreensão dos efeitos observados sobre os padrões de qualidade tanto do processo em si, como do produto final.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, A. J.; ANAZAWA, R.M.; HASHIMOTO, T.M.; PEREIRA, M.S.; SOUZA, G. A.; CARRER, G. R.; SILVA, O.M.M. Caracterização microestrutural de aços multifásicos por microscopia óptica com a utilização de diferentes ataques químicos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS*, 18., 2008, Porto de Galinhas. **Anais [...]**. Porto de Galinhas: CBECiMat, 2008. p. 6061-6069.
- ABELE, E.; DÖRR, J. Ferramentas de corte protegidas contra a defasagem tecnológica. **Máquinas e Metais**, São Paulo, v.38, n. 439, p. 38-53, 2002.
- ALVES, M.; BIANCHI, E.; AGUIAR, P. Influência da lubrificação na qualidade superficial de metais retificados. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 64, n. 4, p. 505–512, 2011.
- 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. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/3791>. Acesso em: 27 mar. 2020.
- ASILTURK, I.; NESELI, S. Multi response optimisation of cnc turning parameters via Taguchi method-based response surface analysis. **Measurement**, London, v. 45, n. 4, p. 785-794, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224111004416>. Acesso em: 27 mar. 2020.
- BERNARDOS, P. G.; VOSNIAKOS, G. S. Predicting surface roughness in machining: a review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v. 43, n. 8, p. 833-844, 2003. Disponível em: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-df8d616e-21fd-35e0-b988-4ab6d1a37eb1>. Acesso em: 15 abr. 2020.
- BHATTACHARYA, S.; DINDA, G. P.; DASGUPTA, A. K.; MAZUMDER, J. Microstructural evolution of AISI 4340 steel during Direct Metal Deposition process. **Materials Science and Engineering A**, Lausanne, v. 528, n. 6, p. 2309–2318, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509310013237?via%3Dihub>. Acesso em: 15 abr. 2020.
- 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**, Dearborn, v. 33, n. 4, p. 476–487, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278612514000429?via%3Dihub>. Acesso em: 15 abr. 2020.
- BOING, D.; NOLL, C.; MANTELI, L. D. Análise da influência da classe da ferramenta de metal-duro no torneamento do aço AISI 4340 endurecido. **Revista da UNIFEPE**, Brusque, v. 1, n. 16, p. 5–19, 2017. Disponível em: <https://periodicos.unifepe.edu.br/index.php/revistaeletronicadaunifepe/article/view/424>. Acesso em: 20 maio 2020.

BONFÁ, M. M.; **Torneamento do aço endurecido AISI D6 utilizando mínima quantidade de fluido de corte**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

BONIFÁCIO, M. E. R. **Monitoramento do processo de torneamento de acabamento via sinais de vibração**. 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

CAMPOS, P. H. S. **Metodologia DEA-OTS: uma contribuição para a seleção ótima de ferramentas no torneamento do aço ABNT H13 endurecido**. 2015. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015. Disponível em:

https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/127/1/tese_campos_2015.pdf.

Acesso em: 24 jun. 2020.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: materiais de construção mecânica**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

CHOUDHURY, A.; TANDON, N. Application of acoustic emission technique for the detection of defects in rolling element bearings. **Industrial Tribology Machine Dynamics**, New Delhi, v. 33, n. 1, p. 39 – 45, 2000. Disponível em:

<http://eprint.iitd.ac.in/handle/2074/770>. Acesso em: 15 abr. 2020.

COCKERILL, A.; CLARKE, A.; PULLIN, R.; BRADSHAW, T.; COLE, P.; HOLFORD, K. M. Determination of rolling element bearing condition via acoustic emission. **Journal of Engineering Tribology**, Bury Saint Edmunds, v. 230, n. 11, p. 1377 – 1388, 2016. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1350650116638612>. Acesso em: 20 mar. 2020.

COSTA, C. E. **Monitoramento do processo de torneamento via corrente elétrica do motor principal da máquina e via vibração da ferramenta**, 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

DAGNALL, H. **Exploring surface texture**. 2. ed. Inglaterra: Taylor Hobson, 1986.

DEARNLEY, P. A.; TRENT, E. M. Wear mechanisms of coated carbide tools. **Metals Technology**, New York, v. 9, n. 1, p. 60 – 75, 1982. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/272307204_Wear_mechanisms_of_coated_carbide_tools. Acesso em: 14 jun. 2020.

DINIZ, A. E.; DE OLIVEIRA, A. J. Hard turning of interrupted surface using CBN tool. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 195, n. 1-3, p. 275-281, 2008.

Disponível em: <https://www.infona.pl/resource/bwmata1.element.elsevier-58246470-c270-3e37-a382-77e9eda202e7>. Acesso em: 15 maio 2020.

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

FREITAS, R. DE S. **Torneamento do aço SAE 4340 com diferentes sistemas de lubrificação (a seco, jorro e mínima quantidade de lubrificante)**, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Automotiva) – Faculdade do Gama, Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/19792>. Acesso em: 23 jul. 2020.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 9. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.

GINTING, A.; NOUARI, M. Optimal cutting conditions when dry end milling the aeroengine material Ti-6242S. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 184, n. 1, p. 319-324, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013606011307?via%3Dihub>. Acesso em: 15 abr. 2020.

GOINDI, G. S.; SARKAR, P. Dry machining: a step towards sustainable machining - challenges and future directions. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 165, n. 1, p. 1557-1571, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617316918>. Acesso em: 20 ago. 2020.

GRZESIK, W.; RECH, J.; WANAT, T. Surface finish on hardened bearing steel parts produced by super hard an abrasive tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v. 47, n. 2, p. 255-262, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/223372798_Surface_finish_on_hardened_bearing_steel_parts_produced_by_superhard_and_abrasive_tools. Acesso em: 8 jun. 2020.

HASE, A.; MISHINA, H.; WADA, M. Correlations between features of acoustic emission signals and mechanical wear mechanisms. **Wear**, Lausanne, v. 292-293, n. 1, p. 144 – 150, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/256913528_Correlation_between_features_of_acoustic_emission_signals_and_mechanical_wear_mechanisms. Acesso em: 10 jul. 2020.

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

KOELSCH, J. R. Ferramentas de carbetto: o estado da arte. **Máquinas e Metais**, São Paulo, v. 36, n. 415, p. 186-201, ago. 2000.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren**. 8. auflage. Aachen: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

KOPAC, J.; SOKOVIC, M.; DOLINSEK, S., Tribology of coated tools in conventional and HSM machining. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 118, n. 1-3, p.377 – 384, 2001. Disponível em: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-d1d9bf8d-c0db-34ae-b06c-485d6555e234>. Acesso em: 30 ago. 2020.

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**, London, v. 58, n. 1, p. 73-86, 2014. Disponível

em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224114003546?via%3Dihub>. Acesso em: 14 abr. 2020.

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

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. **Usinagem dos metais**, 2009. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/182227159/Usinagem-Dos-Metais-Machado-e-Da-Silva-2004>. Acesso em: 20 set. 2020.

MORE, A. S; JIANG, W; BROWN, W. D; MALSHE A. P. Tool wear and machining performance of CBN–TiN coated carbide inserts and PCBN compact inserts in turning AISI 4340 hardened steel. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 180, n. 1-3, p. 253–262, 2006. Disponível em: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-933fccb6-9fa9-3da9-a91d-6c8acb37e8bc>. Acesso em: 03 abr. 2020.

NESLUŠAN, M.; **Turning of hardened steel**. Zilina: Edis, 2010.

NING Y.; RAHMAN, M.; WONG, Y. S. Investigation of chip formation in high speed end milling. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 113, n. 1-3, p. 360-367, 2001. Disponível em: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-79945a65-68d0-379d-b3ee-2ed84fa4fedf>. Acesso em: 30 jun. 2020.

NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. São Paulo: Editora Blucher, 1994.

OLIVEIRA, A. J.; DINIZ, A. E.; URSOLINO, D. J. Hard turning in continuous and interrupted cut with pcbn and whisker-reinforced cutting tools. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 209, n. 1-3, p. 5262 – 5270, 2009. Disponível em: https://moam.info/journal-of-materials-processing-technology-hard-semantic-scholar_5996ded21723ddcf69a41d69.html. Acesso em: 30 mar. 2020.

PIRATELLI, A. Acreditação do laboratório de metrologia dimensional da Universidade de Brasília. **Revista Produção Online**, Brasília, v. 11, n. 1, p. 96 – 115, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/10682?mode=full>. Acesso em: 14 ago. 2020.

REDDY, N. S.; RAO, P. V. Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 26, n. 1, p. 1202-1210, 2005. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-004-2110-y#citeas>. Acesso em: 08 ago. 2020.

REDDY, T. S.; REDDY, C. E. Real time monitoring of surface roughness by acoustic emission in CNC Turning. **Journal of Engineering Science and Technology Review Kavala Institute of Technology**, Kavala, v. 3, n. 1, p. 111-115, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/44385743_Real_Time_Monitoring_of_Surface_Roughness_by_Acoustic_Emissions_in_CNC_Turning. Acesso em: 11 jun. 2020.

SCHULZ, H.; EMRICH, A.K., FINZER, T.; DÖR, J. Quais são e para que servem os revestimentos. **Máquinas e Metais**, São Paulo, v.416, n. 416, p.38-45, 2000.

SEVALE, L. G. **Estudo da influência de tratamentos térmicos nas variações microestruturais do aço SAE 4340**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

SHASHIDHARA, Y. M.; JAYARAM, S. R. Vegetable oils as a potential cutting fluid-An evolution. **Tribology International**, Oxford, v. 43, n. 5–6, p. 1073–1081, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X09004022?via%3Dihub>. Acesso em: 29 maio 2020.

SHAW, M. C. **Metal cutting principles**. New York: Oxford university press, 2005.

SIDDHPURA, M.; PAUROBALLY, R. A review of chatter vibration research in turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Oxford, v. 61, n. 2, p. 27 – 47, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695512000831?via%3Dihub>. Acesso em: 07 set. 2020.

SILVA NETO, J. C. **Metrologia e controle dimensional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

SIMUNOVIC, K.; SIMUNOVIC, G.; SARIC, T. Single and multiple goal optimization of structural steel face milling process considering different methods of cooling/lubricating. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 94, n.1, p. 321-329. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652615001195?via%3Dihub>. Acesso em: 04 ago. 2020.

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

SOUTO, U. B. **Monitoramento do desgaste de ferramenta no processo de fresamento via emissão acústica**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

SOUZA, A. J. **Processos de fabricação por usinagem**, 2016. Disponível em <https://docplayer.com.br/58306943-Universidade-federal-do-rio-grande-do-sul-departamento-de-engenharia-mecanica-laboratorio-de-automacao-em-usinagem-apostila.html>. Acesso em: 10 maio 2020.

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

STOETERAU, R. L. **Processo de torneamento e tornos**, 2007. Disponível em: http://files.alfa-silva.webnode.com/200000005-28d552952d/Aula-13-U-2007-1-torneamento_e_tornos-p1.pdf. Acesso em: 10 maio 2020.

SURESH, R.; BASAVARAJAPPA, S.; SAMUEL, G. L. Some studies on hard turning of aisi 4340 steel using multilayer coated carbide tool. **Measurement**, London, v. 45, n. 7, p. 1872 – 1884, 2012. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224112001443>. Acesso em: 21 out. 2020.

TAN, C. K.; IRVING, P.; MBA, D. A comparative experimental study on the diagnostic and prognostic capabilities of acoustics emission, vibration and spectrometric oil analysis for spur gears. **Mechanical Systems and Signal Processing**, London, v. 21, n.1, p. 208 – 233, 2007. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/222833805_A_comparative_experimental_study_on_the_diagnostic_and_prognostic_capabilities_of_acoustics_emission_vibration_and_spectrometric_oil_analysis_for_spur_gears. Acesso em: 11 abr. 2020.

TELES, J. M.; FERREIRA, J. R. **Torneamento de ferro fundido nodular ferritizado com nióbio utilizando ferramentas de metal duro**, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

TETI, R.; JEMIELNIAK, K.; O'DONNELL, G.; DORNFELD, D. Advanced monitoring of machining operations. **CIRP Annals: Manufacturing Technology**, Paris, v. 59, n. 2, p. 3 - 10, 2010. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850610001976?via%3Dihub>. Acesso em: 17 jun. 2020.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. 4. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000.

VENTURA, C. E. H.; DENKANA, B. **Preparação de arestas de ferramentas de cerâmica mista por retificação e sua aplicação no torneamento de aço endurecido**. p. 20–21, set. 2016.

WERTHEIM, R. Development of CGI cutting materials. In: COMPACTED GRAPHIT IRON – MACHINING WORKSHOP, 5., 2002. Darmstadt. **Anais [...]** Darmstadt: PTW – Institute of Production and Machine Tools, 2002.

YALLESE, M. A., CHAOUI, K., ZEGHIB, N., BOULANOUAR, L., RIGAL, J. Hard Machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool. **Journal of Material Processing Technology**, Amsterdam, v. 209, n. 5, p. 1092-1104, 2009.

ZEILMANN, R. P.; VALLEJOS, R. V.; LINZMEIER, P. R.; BORBA, D.; ROVARIS, J. L.; BESUTTI, K.; KUZER, M. S.; SANTIN, R. **Ensaio experimental 03: avaliação dos critérios de usinabilidade referente ao aço AISI H13**. Relatório de Pesquisa, UCS Departamento de Engenharia Mecânica, Caxias do Sul, 2004.

ZHOU, J. M.; ANDERSSON, M.; STAHL, J. E. The monitoring of flank wear on the CBN tool in the hard turning process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 22, n.1, p. 697-702, 2003.