

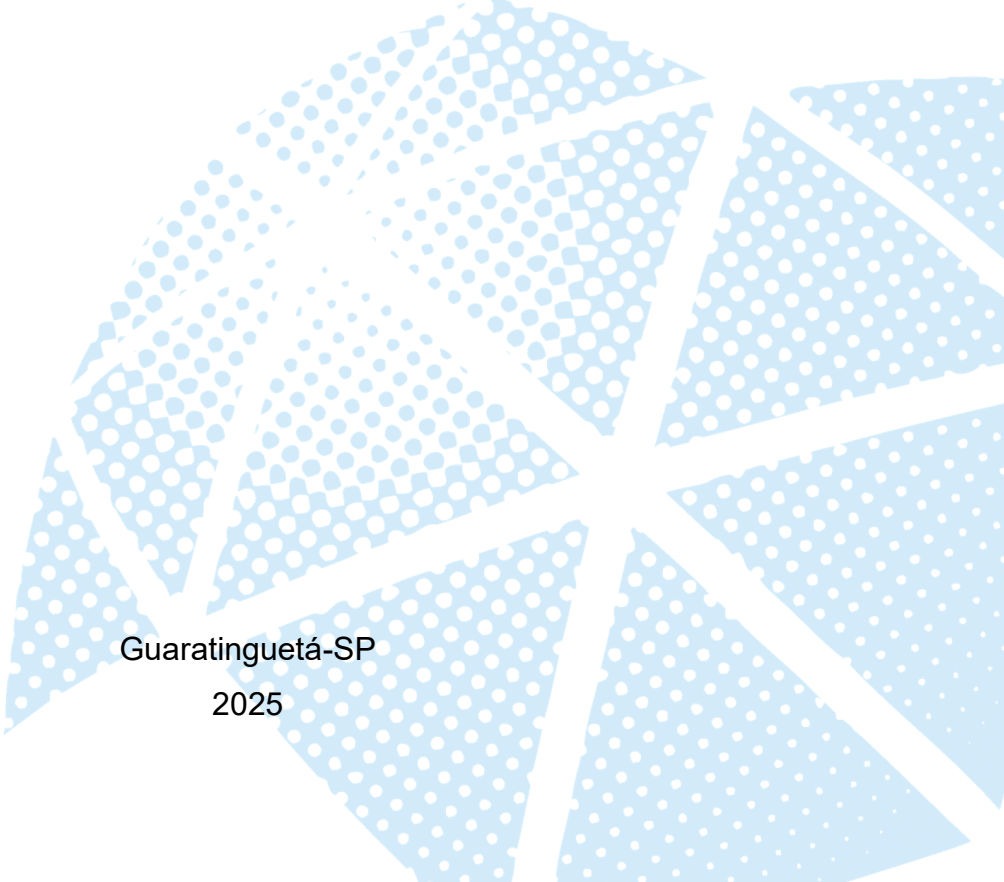
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

MATHEUS RODRIGUES DANZI SALVIA

**USINABILIDADE DO AÇO SAE 4340 ENDURECIDO NO PROCESSO DE
TORNEAMENTO UTILIZANDO FERRAMENTAS CERÂMICAS ÓXIDAS**

Guaratinguetá-SP

2025



MATHEUS RODRIGUES DANZI SALVIA

**USINABILIDADE DO AÇO SAE 4340 ENDURECIDO NO PROCESSO DE
TORNEAMENTO UTILIZANDO FERRAMENTAS CERÂMICAS ÓXIDAS**

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

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves

Guaratinguetá-SP

2025

S184u	Salvia, Matheus Rodrigues Danzi Usinabilidade do aço SAE 4340 endurecido no processo de torneamento utilizando ferramentas cerâmicas óxidas / Matheus Rodrigues Danzi Salvia - Guaratinguetá, 2025. 81 f : il. Bibliografia: f. 74-79 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025. Orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves 1. Usinagem 2. Aço de alta resistência. 3. Ferramentas de corte. 4. Materiais cerâmicos. I. Título. CDU 621.9
-------	--

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

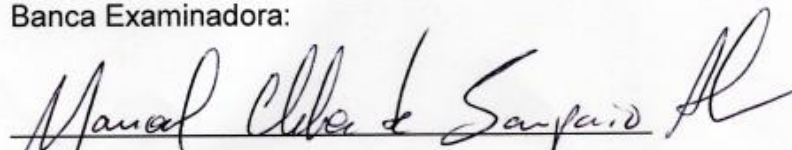
MATHEUS RODRIGUES DANZI SALVIA

**USINABILIDADE DO AÇO SAE 4340 ENDURECIDO NO PROCESSO DE
TORNEAMENTO UTILIZANDO FERRAMENTAS CERÂMICAS ÓXIDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá/SP, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data da defesa: 14 / 11 / 2025

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
UNESP - Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá/SP



Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza
UNESP - Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá/SP



Prof. Mestre Murilo Alves Lima
Doutorando do departamento de Materiais e Tecnologia UNESP/FEG

Dedico este trabalho ao meu filho

Antônio Carvalho de Almeida Danzi Salvia

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Rosana Maria Rodrigues Salvia e José Gilberto Danzi Salvia, pela dedicação de toda uma vida.

À minha noiva, Ludmila Lais de Almeida, pelo amor e companheirismo.

Ao meu filho, Antônio Carvalho de Almeida Danzi Salvia, que me faz querer ser sempre o melhor.

Aos professores e funcionários da UNESP, que colaboraram com a conclusão desta jornada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves, pela gentileza em compartilhar sua experiência e conhecimento.

Aos colegas de curso, pelos momentos de amizade.

“O verdadeiro método de conhecimento é
a experimentação.”

William Blake

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de ferramentas cerâmicas óxidas dopadas com óxido de magnésio ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) e com óxido de cromo ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$), na usinagem a seco do aço SAE 4340 endurecido. A pesquisa buscou analisar a viabilidade técnica dessas ferramentas como alternativa às ferramentas convencionais de alto custo, como CBN e diamante, utilizadas no torneamento de materiais de elevada dureza. Foram realizados ensaios experimentais em torno CNC, com variação dos parâmetros de corte de velocidade e avanço, e analisadas as variáveis de saída potência consumida, vibração, emissão acústica, rugosidade média (R_a), rugosidade total (R_t) e desgaste específico de flanco (VB/LC). A análise estatística dos resultados foi conduzida por meio de análise de variância (ANOVA) e gráficos de efeitos principais e de interação, com nível de confiança de 95%. Os resultados mostraram que o avanço foi o fator de corte mais influente em praticamente todas as variáveis analisadas. Na comparação entre as ferramentas, a composição dopada com MgO apresentou melhor desempenho na maioria dos critérios avaliados, com menor potência consumida, menor vibração, menor rugosidade total e menor desgaste específico, indicando maior eficiência energética, estabilidade dinâmica e resistência ao desgaste. A ferramenta dopada com Cr_2O_3 apresentou melhor desempenho apenas na emissão acústica, enquanto não foram observadas diferenças estatisticamente significativas na rugosidade média. De modo geral, as ferramentas cerâmicas óxidas mostraram-se adequadas para o torneamento a seco de aços endurecidos, oferecendo ainda menor impacto ambiental pela eliminação de fluidos de corte. Conclui-se que a ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ apresentou o melhor desempenho, sendo uma alternativa tecnicamente viável para processos industriais de usinagem em materiais de elevada dureza.

Palavras-chave: usinagem; torneamento; aço endurecido; ferramentas de corte; usinagem sem fluido de corte; alta velocidade de corte.

ABSTRACT

The present work aimed to evaluate the performance of oxide ceramic tools doped with magnesium oxide ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) and chromium oxide ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$) in the dry machining of hardened SAE 4340 steel. The research sought to analyze the technical feasibility of these tools as an alternative to conventional high-cost tools, such as CBN and diamond, commonly used in the turning of high-hardness materials. Experimental tests were carried out on a CNC lathe, varying the cutting parameters of speed and feed, and analyzing the output variables cutting power, vibration, acoustic emission, average roughness (R_a), total roughness (R_t), and specific flank wear (VB/LC). Statistical analysis of the results was performed using analysis of variance (ANOVA) and main effect and interaction plots, with a confidence level of 95%. The results showed that feed was the most influential cutting parameter in almost all analyzed variables. In the comparison between tools, the composition doped with MgO showed better performance in most evaluated criteria, with lower power consumption, lower vibration, lower total roughness, and lower specific wear, indicating higher energy efficiency, dynamic stability, and wear resistance. The tool doped with Cr_2O_3 showed better performance only in acoustic emission, while no statistically significant differences were observed in average roughness. Overall, oxide ceramic tools proved suitable for the dry turning of hardened steels, also providing a lower environmental impact due to the elimination of cutting fluids. It was concluded that the $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ tool presented the best performance, being a technically feasible alternative for industrial machining processes involving high-hardness materials.

Keywords: machining; turning; hard steel; cutting tools; dry machining; high-speed cutting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Torneamento	19
Figura 2 – Parâmetros de Corte	20
Figura 3 – Faixas de velocidade para diferentes materiais de corte	25
Figura 4 – Definição dos parâmetros utilizados para cálculo de R_a e R_t	33
Figura 5 – Definição da altura máxima média (R_z).....	34
Figura 6 – Centro de Torneamento CNC Romi modelo GL 240M.....	43
Figura 7 – Geometria da ferramenta, código SNGN120408.....	44
Figura 8 – Fotografia da ferramenta cerâmica óxida de Al_2O_3 -MgO	44
Figura 9 – Corpo de prova.....	45
Figura 10 – Sistema de aquisição de dados.....	46
Figura 11 – Sensor de corrente, marca LEM, modelo AT 100 B10	47
Figura 12 – Sensor piezelétrico, marca VibroControl, modelo TV100	48
Figura 13 – Módulo emissão acústica (1), sensor (2) e amplificador (3).	49
Figura 14 – Rugosímetro marca Mahr modelo Marsurf M300	50
Figura 15 – Estereoscópio da Marca Mahr, modelo MarVision MM200	51
Figura 16 – Gráfico de Efeitos Principais para Potência (W).....	54
Figura 17 – Gráfico de Interação para Potência (W)	55
Figura 18 – Gráfico de Efeitos Principais para Vibração (m/s).....	57
Figura 19 – Gráfico de Interação para Vibração (m/s)	58
Figura 20 – Gráfico de Efeitos Principais para Emissão Acústica (V)	60
Figura 21 – Gráfico de Interação para Emissão Acústica (V).....	61
Figura 22 – Gráfico de Efeitos Principais para Rugosidade Média (μm).....	63
Figura 23 – Gráfico de Interação para Rugosidade Média (μm)	64
Figura 24 – Gráfico de Efeitos Principais para Rugosidade Total (μm).....	66
Figura 25 – Gráfico de Interação para Rugosidade Total (μm)	67
Figura 26 – Gráfico de Efeitos Principais para Desgaste $V_b(mm)/L_c$	69
Figura 27 – Gráfico de Interação para Desgaste $V_b(mm)/L_c$	70

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 – Diferentes características dos principais processos de usinagem.....	18
Quadro 2 – Durezas HRC típicas dos principais tipos de aços	23
Quadro 3 – Comparativo entre <i>hard turning</i> e retífica	24
Quadro 4 – Comparativo entre ferramentas de metal duro e cerâmicas	27
Quadro 5 – Comparativo entre ferramentas de metal duro e cerâmicas	29
Quadro 6 – Recobrimentos mais comuns em ferramentas de corte	30
Quadro 7 – Tipos de desgaste, mecanismos, características e contramedidas.....	39
Quadro 8 – Síntese dos resultados obtidos para as ferramentas de corte.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis de entrada.....	45
Tabela 2 – Análise de Variância da Potência	53
Tabela 3 – Análise de Variância da Vibração.....	56
Tabela 4 – Análise de Variância da Emissão Acústica	59
Tabela 5 – Análise de Variância da Rugosidade Média (Ra)	62
Tabela 6 – Análise de Variância da Rugosidade Total (Rt)	65
Tabela 7 – Análise de Variância do Desgaste Específico (Vb/Lc).....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> (Análise de Variância)
CBN	<i>Cubic Boron Nitride</i> (Nitreto Cúbico de Boro)
Cr ₂ O ₃	Óxido de Cromo
CNC	<i>Computer Numerical Control</i> (Comando Numérico Computadorizado)
EA	Emissão Acústica
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
HRC	<i>Hardness Rockwell C</i> (Dureza Rockwell C)
LC	<i>Lenght of Contact</i> (Comprimento de Contato)
MgO	Óxido de magnésio
R _a	<i>Roughness Average</i> (Rugosidade Média)
R _t	<i>Total Roughness</i> (Rugosidade Total)
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

Símbolo	Descrição	Unidade
AE	Emissão acústica (<i>Acoustic Emission</i>)	V (volt)
f	Avanço da ferramenta	mm/rev
I	Corrente elétrica	A (ampère)
LC	Comprimento de contato entre peça e ferramenta	mm
P	Potência total consumida no corte	W (watt)
R _a	Rugosidade média aritmética	μm
R _t	Rugosidade total	μm
t	Tempo de corte	s
U	Tensão elétrica de alimentação	V (volt)
V _b	Largura de desgaste de flanco	mm
V _b /L _c	Desgaste específico de flanco	---
V _c	Velocidade de corte	m/min
V _{cc}	Tensão contínua (<i>Voltage continuous current</i>)	V (volt)
V _{ib}	Nível de vibração medida	mm/s
W	Potência de corte	W (watt)
α	Nível de significância estatística	---

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO GERAL	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	USINAGEM	17
2.2	TORNEAMENTO	18
2.3	PARÂMETROS DE CORTE	20
2.3.1	Velocidade de corte (V_c)	20
2.3.2	Avanço (f)	21
2.3.3	Profundidade de corte (d)	21
2.4	HARD TURNING	22
2.5	MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE	24
2.5.1	Metal Duro (carbeto cementado)	25
2.5.2	Ferramentas Cerâmicas	26
2.5.3	Ferramentas Cerâmicas Óxidas	28
2.5.4	Recobrimentos em Ferramentas de Corte	29
2.6	MATERIAL USINADO: AÇO SAE 4340 ENDURECIDO	31
2.7	VARIÁVEIS NO TORNEAMENTO DE AÇOS ENDURECIDOS	32
2.7.1	Rugosidade	32
2.7.2	Desgaste da Ferramenta	35
2.7.3	Potência de Corte	36
2.7.4	Vibração	37
2.7.5	Emissão acústica	38
2.8	DESGASTE E AVARIAS NAS FERRAMENTAS DE CORTE	39
2.9	ASPECTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	46
3.2	POTÊNCIA CONSUMIDA	47
3.3	VIBRAÇÃO	48
3.4	EMISSÃO ACÚSTICA	49
3.5	MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE	49
3.6	DESGASTE DAS FERRAMENTAS E ANÁLISE DE CAVACOS	50

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1	POTÊNCIA	52
4.2	VIBRAÇÃO	56
4.3	EMIÇÃO ACÚSTICA	58
4.4	RUGOSIDADE MÉDIA (R_a).....	61
4.5	RUGOSIDADE TOTAL (R_t).....	64
4.6	DESGASTE ESPECÍFICO (VB/LC).....	67
5	CONCLUSÃO.....	72
	REFERÊNCIAS	74
	GLOSSÁRIO.....	80

1 INTRODUÇÃO

A usinagem é um dos processos de fabricação mais utilizados na indústria, responsável por produzir componentes com precisão dimensional e bom acabamento superficial. Entre os diversos tipos de usinagem, o torneamento se destaca pela versatilidade e pela capacidade de gerar peças cilíndricas com diferentes geometrias e níveis de acabamento (Ferraresi, 2018). O desenvolvimento de novas ferramentas e materiais de corte tem permitido ampliar o uso desse processo, inclusive em materiais de elevada dureza.

O aço SAE 4340 é uma liga amplamente empregada em aplicações que exigem alta resistência mecânica, tenacidade e durabilidade, como eixos, engrenagens, virabrequins e componentes aeronáuticos (da Costa; Mei, 2010). Quando submetido a tratamentos térmicos, esse aço adquire dureza acima de 50 HRC, tornando o processo de usinagem mais difícil e desgastante para as ferramentas de corte (Campos *et al.*, 2014). Tradicionalmente, o torneamento de aços endurecidos é realizado com ferramentas de CBN ou diamante, que apresentam excelente desempenho, mas possuem custo elevado.

Nesse contexto, as ferramentas cerâmicas óxidas, especialmente as construídas à base de Al_2O_3 , surgem como uma alternativa de menor custo e de bom desempenho, oferecendo alta dureza, estabilidade térmica e resistência ao desgaste (Seleznev *et al.*, 2021). Além disso, o uso dessas ferramentas viabiliza o torneamento a seco, eliminando a necessidade de fluidos de corte e reduzindo o impacto ambiental e o custo operacional.

O estudo pretende contribuir para o entendimento da aplicabilidade de ferramentas cerâmicas em aços de elevada dureza, ampliando o uso de materiais alternativos de menor custo e maior sustentabilidade, sem comprometer a qualidade e a eficiência do processo de usinagem.

Este trabalho tem como foco estudar a usinabilidade do aço SAE 4340 endurecido utilizando ferramentas cerâmicas óxidas dopadas com óxido de magnésio ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) e com óxido de cromo ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$), desenvolvidas na UNESP/FEG. A pesquisa irá abordar o entendimento do comportamento dessas ferramentas em diferentes condições de corte, considerando variáveis como rugosidade da superfície usinada, desgaste da ferramenta, potência consumida, vibração e emissão acústica.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de ferramentas cerâmicas óxidas dopadas com óxido de magnésio ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) e com óxido de cromo ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$), desenvolvidas na UNESP/FEG, na usinagem do aço SAE 4340 endurecido, em condições de corte a seco. O estudo busca analisar a viabilidade do uso dessas ferramentas como alternativa técnica e econômica às ferramentas convencionais utilizadas no torneamento de materiais de alta dureza.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- ◆ Analisar o comportamento da qualidade superficial da peça usinada, por meio da medição dos parâmetros de rugosidade média (R_a) e rugosidade total (R_t);
- ◆ Avaliar a potência consumida, a vibração e a emissão acústica durante o processo de torneamento, sob diferentes condições de corte;
- ◆ Verificar o desgaste das ferramentas cerâmicas para cada condição de ensaio;
- ◆ Estudar os efeitos dos parâmetros de usinagem – velocidade de corte, avanço e profundidade de corte – sobre o desempenho das ferramentas e a qualidade da superfície;
- ◆ Comparar o comportamento das ferramentas cerâmicas dopadas com MgO e com Cr_2O_3 , identificando vantagens e limitações de cada composição no torneamento do aço SAE 4340 endurecido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta Revisão Bibliográfica tem o objetivo de apresentar os principais conceitos relacionados ao tema deste trabalho. São discutidos fundamentos de usinagem, as características do processo de torneamento e os parâmetros de corte que influenciam no desempenho. Também são abordados aspectos específicos do torneamento de materiais endurecidos, conhecidos como *hard turning*, e os diferentes tipos de materiais utilizados em ferramentas de corte, com destaque para as cerâmicas óxidas. Além disso, são descritas as propriedades do aço SAE 4340 endurecido, as variáveis de saída mais relevantes do processo e os mecanismos de desgaste das ferramentas.

2.1 USINAGEM

A usinagem é um dos processos mais utilizados na indústria de manufatura. Ela consiste na remoção controlada de material de uma peça bruta para se obter a forma, as dimensões e o acabamento desejados (Boothroyd; Knight, 1989). Trata-se um processo versátil, capaz de produzir desde componentes simples até peças de alta precisão, sendo um processo de fabricação essencial em setores como automotivo, aeronáutico e de bens de capital (Autodesk Inc., 2014).

Os processos de usinagem podem ser classificados em diferentes grupos. Entre os mais comuns estão o torneamento, o fresamento e a furação, que se caracterizam por utilizarem ferramentas de corte que possuem uma geometria definida. Há também os processos abrasivos, como a retificação e o brunimento, que usam ferramentas com grãos abrasivos. Além disso, existem os processos não convencionais, como a eletroerosão e o corte a laser, empregados em materiais de difícil usinagem ou com geometrias complexas (Kalpakjian; Schmid, 2014; Groover, 2016). O Quadro 1 apresenta uma comparação entre os diferentes processos de usinagem mais comumente utilizados.

Quadro 1 – Diferentes características dos principais processos de usinagem

Processo	Ferramenta	Movimento principal	Aplicações típicas
Torneamento	Ferramenta de ponta única	Rotação da peça	Eixos, buchas, superfícies cilíndricas
Fresamento	Fresa (múltiplas pontas cortantes)	Rotação da ferramenta	Cavidades, canais, superfícies planas/complexas
Furação	Broca helicoidal	Rotação da ferramenta	Furos passantes e cegos
Retificação	Rebolo abrasivo	Rotação do rebolo	Acabamento de alta precisão, tolerâncias finas
Brunimento	Ferramenta abrasiva com movimento alternado	Movimento alternado + rotação	Acabamento interno de cilindros (motores, mancais)
Eletroerosão (EDM)	Eletrodo (fio ou ferramenta sólida)	Descarga elétrica	Moldes, matrizes, geometrias complexas
Corte a laser	Feixe de laser	Feixe concentrado	Chapas metálicas, microcortes de precisão

Fonte: Kalpakjian; Schmid (2014); Groover (2016).

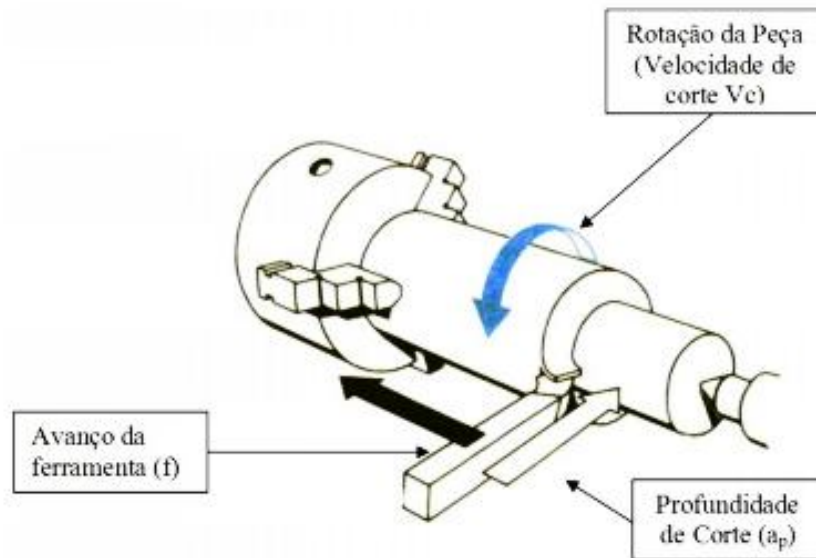
O termo usinabilidade se refere à facilidade com que um material pode ser usinado, mantendo o equilíbrio entre a qualidade superficial, o desgaste de ferramenta e a produtividade (Stephenson; Agapiou, 2016). Materiais diferentes apresentam comportamentos distintos durante o corte. Esses comportamentos são influenciados por propriedades como dureza, microestrutura e condutividade térmica. A avaliação da usinabilidade é um aspecto importante para a escolha adequada de parâmetros de corte e do material de ferramenta, influenciando diretamente o custo do processo e a qualidade final do produto obtido.

2.2 TORNEAMENTO

O torneamento é um dos processos de usinagem mais antigos e utilizados na indústria. Consiste na remoção de material por meio do movimento de rotação da peça e avanço controlado da ferramenta. A máquina utilizada recebe o nome de torno. Esse processo é empregado na fabricação de eixos, buchas, mancais e outras peças com geometria cilíndrica ou cônica (Boothroyd; Knight, 1989). Historicamente, os primeiros tornos surgiram ainda na Antiguidade, acionados manualmente ou por pedal. Com a Revolução Industrial, passaram a ser movidos a vapor e, posteriormente, à energia elétrica. O desenvolvimento do comando numérico (CNC)

consolidou o processo como base da usinagem moderna (Autodesk Inc., 2014). A Figura 1 apresenta um esquema de uma operação de torneamento.

Figura 1 – Torneamento



Fonte: Souza (2011).

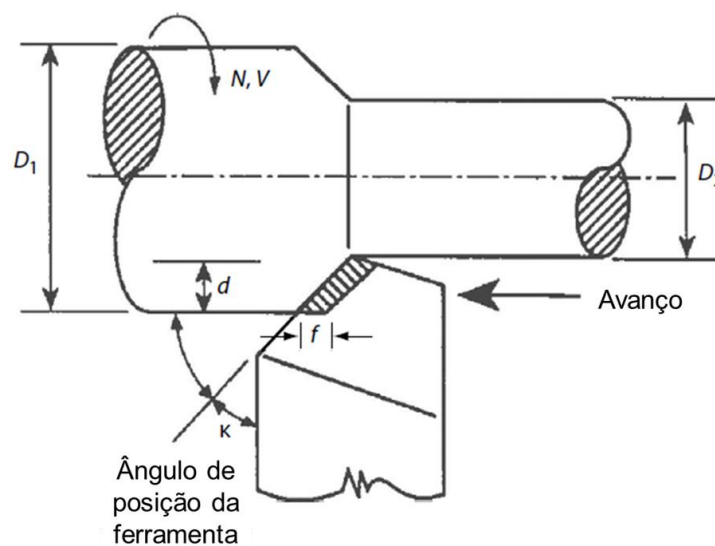
Em comparação com outros processos de usinagem, o torneamento se destaca pela simplicidade de operação e pela versatilidade. Ele permite a fabricação de peças cilíndricas externas e internas, cortes frontais, rosqueamento e acabamento de superfícies. Em relação ao fresamento ou à retificação, o torneamento apresenta maior taxa de remoção de material e menor custo inicial de equipamento. Porém, ele possui limitações quando se trata de produzir geometrias complexas, como cavidades e superfícies tridimensionais, onde o fresamento é mais adequado (Stephenson; Agapiou, 2016).

No caso de materiais de elevada dureza, o torneamento apresenta vantagens em relação a outros processos. Ele pode substituir etapas de retificação em determinadas condições, reduzindo tempo e custo de produção. Também possibilita operar em altas velocidades, principalmente com o uso de ferramentas cerâmicas ou de carbetos cementados. Por outro lado, o esforço de corte elevado, além da tendência de maior desgaste da ferramenta e a geração de calor excessivo são limitações importantes a serem consideradas. Esses fatores exigem a escolha adequada de parâmetros de corte e de materiais de ferramenta para garantir a viabilidade do processo (Stephenson; Agapiou, 2016).

2.3 PARÂMETROS DE CORTE

Os parâmetros de corte são variáveis controladas no processo de torneamento. Eles determinam o volume de material removido, a qualidade da superfície e a vida útil da ferramenta (Boothroyd; Knight, 1989). Segundo Stephenson e Agapiou (2016), os principais parâmetros de corte são a velocidade de corte (V_c), o avanço (f) e a profundidade de corte (d), que são apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Parâmetros de Corte



Fonte: Stephenson; Agapiou (2016).

2.3.1 Velocidade de corte (V_c)

A velocidade de corte é a velocidade tangencial entre a peça e a aresta da ferramenta. Ela depende do diâmetro da peça e da rotação do torno. Valores elevados aumentam a taxa de remoção do material e melhoram o acabamento. Porém, valores elevados da velocidade de corte também elevam a temperatura na zona de corte, acelerando o desgaste da ferramenta (Stephenson; Agapiou, 2016). A velocidade de corte (V_c) é determinada pela equação 1:

$$V = \pi N \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (1)$$

Onde V é a velocidade de corte (em mm/min);

N é o número de rotações por minuto da peça (rpm);

D_1 é o diâmetro original da peça (em mm);

D_2 é o diâmetro da peça depois do corte (em mm).

2.3.2 Avanço (f)

O avanço (f) é a distância percorrida pela ferramenta a cada rotação da peça (mm/rotação). Ele controla a espessura do cavaco. Avanços maiores aumentam a produtividade, mas geram maior rugosidade e esforço de corte. Avanços menores melhoram a qualidade superficial, porém reduzem a taxa de remoção (Stephenson; Agapiou, 2016). A taxa de avanço (f_r) é a velocidade com a qual a ferramenta avança longitudinalmente em relação à peça, em mm/minuto. A relação entre a taxa de avanço (f_r) e o avanço (f) é dada pela rotação da peça, conforme a equação 2:

$$f_r = f \cdot N \quad (2)$$

Onde f_r é a taxa de avanço (em mm/min);

f é o avanço (em mm por rotação);

N é o número de rotações por minuto da peça (rpm).

2.3.3 Profundidade de corte (d)

A profundidade de corte é a espessura da camada de material retirada em cada passe. É definida pela diferença entre o raio inicial e final da peça. Profundidades maiores permitem maior remoção em menos passes, mas aumentam os esforços sobre a ferramenta e a peça. Em materiais endurecidos, costuma-se adotar profundidades menores para reduzir vibrações e prolongar a vida da ferramenta (Stephenson; Agapiou, 2016). A profundidade de corte (d) é definida pela equação a equação 3:

$$d = \frac{D_1 - D_2}{2} \quad (3)$$

Onde d é a profundidade de corte (em mm);

D_1 é o diâmetro inicial da peça (em mm);

D_2 é o diâmetro final da peça, depois do corte (em mm).

Os três parâmetros de corte influenciam de forma combinada a formação do cavaco e o desempenho do processo de usinagem. O seu controle adequado é necessário para equilibrar produtividade, qualidade da peça produzida e vida útil da ferramenta (Stephenson; Agapiou, 2016). Velocidades elevadas produzem cavacos mais finos e contínuos, mas favorecem o desgaste por difusão e oxidação. Avanços altos geram cavacos espessos e aumentam o risco de formação de aresta postiça. Já grandes profundidades elevam os esforços de corte e podem causar vibração.

2.4 HARD TURNING

O *hard turning* é o torneamento de materiais com dureza elevada, normalmente acima de 45 HRC (de Lima *et al.*, 2007). A dureza Rockwell C (HRC) é uma escala utilizada para avaliar a resistência de um material à penetração. É muito empregada na indústria para caracterizar aços e outros metais usados em usinagem. Como qualquer escala de dureza, valores mais altos indicam materiais mais duros e resistentes ao desgaste, e conseqüentemente também mais difíceis de usar.

A dureza é uma informação importante a se considerar para a escolha correta das ferramentas e dos parâmetros de corte em uma dada aplicação de usinagem. A dureza dos aços para usinagem depende de sua composição (teor de carbono e presença de outros elementos) e de sua estrutura cristalina, que por sua vez é afetada pelos tratamentos térmicos impostos ao material (Thelning, 2013). O Quadro 2 apresenta faixas típicas de dureza de alguns aços endurecidos por tratamento térmico.

Quadro 2 – Durezas HRC típicas dos principais tipos de aços

Tipo de Aço	Código	Dureza Rockwell C
Aços Carbono	SAE 1045	Até 55 HRC após têmpera e revenimento
Aços de Construção Mecânica	SAE 4140	Até 50 HRC após têmpera e revenimento
	SAE 4340	Até 55 HRC após têmpera e revenimento
	SAE 8620	Até 60 HRC após cementação
Aços Ferramenta	VD2	Até 60 HRC após têmpera e revenimento
	VC131	Até 62 HRC após têmpera
Aços Inox	Inox 420	Até 50 HRC após têmpera e revenimento
Aços Mola	H13 (VH13)	Até 52 HRC após têmpera e revenimento
Aço Cromo	52100	Até 64 HRC após têmpera

Fonte: Aços Nobre (2025).

O *hard turning* processo surgiu como uma alternativa à retificação, principalmente em peças temperadas usadas nos setores automotivo, aeroespacial e de ferramentas (Roy *et al.*, 2018). O desenvolvimento de ferramentas de corte mais resistentes ao calor, como as ferramentas cerâmicas e o CBN, permitiu aplicar o torneamento em condições que antes eram restritas à retificação (Lima; Corrêa, 2002).

No *hard turning*, o material é removido por cisalhamento em uma zona de corte estreita, o que gera temperaturas e esforços elevados. O cavaco formado é fino e contínuo, mas a estabilidade do processo depende da rigidez da máquina e da fixação. A dissipação de calor ocorre principalmente pelo cavaco, reduzindo a transferência para a peça e ajudando a manter a integridade dimensional (Campos *et al.*, 2014).

O *hard turning* apresenta vantagens importantes, como substituir a retificação em algumas etapas, reduzindo tempo de setup e custos. Também permite remover maior volume de material em menos tempo e, em muitos casos, realizar operações de desbaste e acabamento em um único passe (Roy *et al.*, 2018). O Quadro 3 apresenta um comparativo de características entre os processos de *hard turning* e de retífica, na usinabilidade de metais.

Quadro 3 – Comparativo entre *hard turning* e retífica

Aspecto	Hard Turning	Retífica
Material da peça	Aços temperados (≥ 45 HRC)	Aços temperados (≥ 45 HRC)
Ferramenta	CBN, cerâmica, ou cerâmica óxida	Rebolo abrasivo
Taxa de remoção de material	Alta (permite remoção em poucos passes)	Baixa (processo mais lento)
Acabamento superficial	Bom, mas menos indicado para tolerâncias muito apertadas	Excelente, adequado para tolerâncias finas
Precisão dimensional	Boa ($\pm 0,01$ mm)	Muito alta ($\pm 0,005$ mm ou melhor)
Custo de setup	Baixo (operação em torno CNC comum)	Alto (requer retificadora dedicada)
Tempo de setup	Curto	Longo
Flexibilidade	Alta (permite desbaste e acabamento na mesma máquina)	Baixa (processo mais específico)
Desgaste da ferramenta	Elevado, devido às altas temperaturas e esforços	Menor, mas requer dressagem periódica do rebolo
Necessidade de fluido de corte	Muitas vezes desnecessário (usinagem a seco)	Geralmente é necessária refrigeração abundante
Custo total	Mais baixo para lotes médios e pequenos	Mais alto, sendo mais atrativo para produção em grande escala

Fonte: Adaptado de Bartarya e Choudhury (2012).

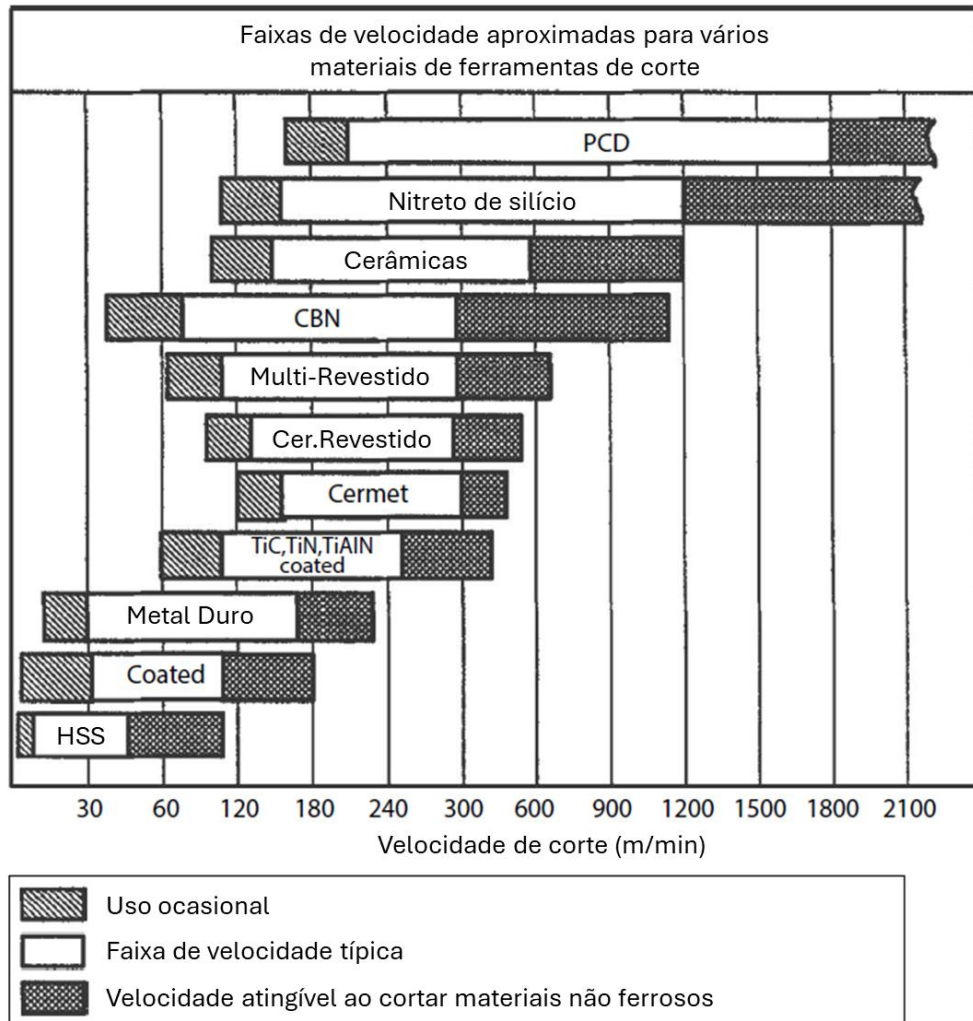
Por outro lado, o *hard turning* tem limitações. A vibração do sistema pode comprometer a qualidade superficial. O desgaste acelerado da ferramenta é comum devido às altas temperaturas e às forças de corte elevadas (Scheffer *et al.*, 2003). Além disso, para garantir resultados de qualidade consistente, é necessário controlar com precisão os parâmetros de corte e usar ferramentas adequadas ao material da peça.

2.5 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE

A escolha do material da ferramenta de corte é um dos fatores mais importantes na usinagem. Ela influencia diretamente a produtividade, a qualidade superficial da peça e a vida útil da ferramenta (Groover, 2016). Os materiais utilizados precisam suportar altas temperaturas, resistir ao desgaste e manter a dureza durante o corte. Entre os mais comuns estão o metal duro (carbeto cementado), as ferramentas cerâmicas e o nitreto cúbico de boro (CBN). Além disso, o uso de recobrimentos tem ampliado o desempenho das ferramentas, permitindo maiores

velocidades de corte e maior durabilidade. A Figura 3 apresenta faixas de velocidade aproximadas para vários materiais de ferramentas de corte.

Figura 3 – Faixas de velocidade para diferentes materiais de corte



Fonte: Stephenson; Agapiou (2016).

2.5.1 Metal Duro (carbeto cementado)

O metal duro, também conhecido como carbeto cementado, é um dos materiais mais utilizados em ferramentas de corte. Ele é produzido pela mistura de partículas duras de carbeto de tungstênio (WC) com um ligante metálico, geralmente o cobalto (Co), que mantém os grãos unidos por sinterização. Esse processo resulta em um material com alta dureza, boa tenacidade e capacidade de suportar temperaturas elevadas durante a usinagem (Stephenson; Agapiou, 2016).

As ferramentas de metal duro apresentam vantagem em relação ao aço rápido (HSS) por permitirem maiores velocidades de corte, como mostrado na Figura 3, e maior vida útil da ferramenta, o que aumenta a produtividade. Por isso, são amplamente utilizadas em operações de torneamento, fresamento e furação de aços de média dureza, ferros fundidos e ligas não ferrosas (Stephenson; Agapiou, 2016).

A dureza do carbetto cementado é mantida mesmo em temperaturas superiores a 800 °C, condição comum na zona de corte. Essa característica, combinada com a boa resistência ao desgaste abrasivo, faz do metal duro uma escolha econômica e versátil para grande parte dos processos de usinagem. No entanto, sua tenacidade é limitada. Em condições de corte interrompido, vibração excessiva ou desbalanceamento, as ferramentas de metal duro podem fraturar (Arsecularatne *et al.*, 2006).

Existem diferentes classes de metal duro, que variam conforme o teor de cobalto e o tamanho dos grãos de carbetto de tungstênio (Kurlov; Gusev, 2013). Teores mais altos de cobalto aumentam a tenacidade, mas reduzem a dureza, sendo indicados para operações mais pesadas. Já grãos mais finos aumentam a resistência ao desgaste e são recomendados para operações de acabamento.

O metal duro também pode receber recobrimentos como TiN, TiAlN ou Al₂O₃, aplicados por processos PVD ou CVD. Esses recobrimentos aumentam a resistência ao desgaste e permitem velocidades de corte ainda mais altas, prolongando a vida da ferramenta (Narasimha; Kumar; Kassie, 2013).

Apesar de todas as vantagens, o metal duro tem limitações no torneamento de materiais com durezas acima de 45 HRC, como os aços temperados. Nessas situações, materiais mais duros e estáveis termicamente, como cerâmicas ou CBN, são mais indicados (Shihab *et al.*, 2014).

2.5.2 Ferramentas Cerâmicas

As ferramentas cerâmicas são produzidas a partir de materiais não metálicos, geralmente compostos por óxidos, nitretos ou carbonetos sinterizados. Seu uso em usinagem ganhou espaço impulsionado pela necessidade de ferramentas que

suportassem velocidades de corte mais altas e mantivessem estabilidade em temperaturas elevadas (Stephenson; Agapiou, 2016).

A principal característica das cerâmicas é a alta dureza a quente, o que permite trabalhar em temperaturas que chegam a 1.200 °C sem perda significativa de resistência. Além disso, apresentam alta resistência ao desgaste abrasivo e boa estabilidade química, especialmente na usinagem de aços endurecidos e ferros fundidos. Essas propriedades possibilitam velocidades de corte até cinco vezes maiores do que as obtidas com ferramentas de metal duro (Stephenson; Agapiou, 2016). O Quadro 4 apresenta uma comparação entre ferramentas de corte de metal duro e ferramentas cerâmicas.

Quadro 4 – Comparativo entre ferramentas de metal duro e cerâmicas

Parâmetro	Metal Duro	Cerâmicas
Estabilidade térmica	Média (perda de dureza a partir de 800°C)	Muito alta (suportam temperaturas acima de 1000°C)
Resistência ao desgaste	Alta	Muito alta
Velocidade de corte	Velocidades médias	Velocidades altas (até cinco vezes maiores que metal duro)
Resistência à abrasão	Boa	Muito Alta (indicada para materiais endurecidos)
Resistência à flexão	Alta	Baixa (frágeis a choques mecânicos)
Aplicações típicas	Torneamento de aços de baixa e média dureza e ligas não ferrosas	Torneamento de aços endurecidos, usinagem a seco

Fonte: Adaptado de Bartarya e Choudhury (2012).

Outro benefício das ferramentas cerâmicas é o bom acabamento superficial obtido em operações de torneamento de precisão, o que muitas vezes elimina etapas adicionais de retificação. Por isso, elas são amplamente utilizadas em setores que demandam alta qualidade dimensional, como automotivo, aeroespacial e de moldes e matrizes. Apesar das vantagens, as ferramentas cerâmicas apresentam baixa tenacidade, o que as torna sensíveis a choques mecânicos e térmicos. Em operações com corte interrompido ou vibrações excessivas, a ferramenta pode lascrar ou fraturar (Sharma *et al.*, 2023). Por esse motivo, elas são mais indicadas para operações contínuas e estáveis, com máquinas rígidas e bem ajustadas.

Existem diferentes tipos de ferramentas cerâmicas. Segundo Ferraresi (2018), as ferramentas cerâmicas mais comuns são: cerâmicas de óxido de alumínio (Al_2O_3), indicadas para torneamento de aços temperados e ferros fundidos; cerâmicas mistas ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$), mais resistentes ao desgaste e com desempenho melhor em condições mais severas; cerâmicas de nitreto de silício (Si_3N_4), mais tenazes, adequadas para usinagem de ligas resistentes ao calor e ferros fundidos nodulares. A escolha do tipo de cerâmica depende do material da peça, do tipo de operação e dos parâmetros de corte.

2.5.3 Ferramentas Cerâmicas Óxidas

As ferramentas cerâmicas óxidas são produzidas, de maneira geral, a partir do óxido de alumínio (Al_2O_3), que é sinterizado para formar um material de alta dureza e de grande estabilidade química. Elas são muito utilizadas no torneamento de aços endurecidos e de ferros fundidos, especialmente em condições de corte contínuo e a seco (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014).

Essas ferramentas apresentam elevada dureza a quente e resistência ao desgaste abrasivo, o que permite trabalhar em velocidades de corte superiores às obtidas com o metal duro (Broniszewski *et al.*, 2013). Outro ponto importante é a estabilidade química, que reduz a adesão de material da peça à ferramenta e melhora a qualidade da superfície usinada. Quando aplicadas em condições adequadas, as ferramentas cerâmicas óxidas proporcionam vantagens que combinam alta produtividade, boa vida útil e qualidade superficial compatível com os requisitos de muitas aplicações industriais.

Apesar dessas vantagens, as cerâmicas óxidas têm baixa tenacidade, o que as torna sensíveis a choques mecânicos e térmicos (Grigoriev; Fedorov; Hamdy, 2019). Por esse motivo, são recomendadas para operações contínuas, com corte uniforme e sem vibração excessiva. Em operações interrompidas, podem lascas e ocorrer fraturas da aresta de corte.

Para melhorar o desempenho dessas ferramentas, é comum realizar-se a adição de elementos de dopagem durante a sinterização (Grigoriev; Fedorov; Hamdy, 2019). Por exemplo, o óxido de magnésio (MgO) atua como inibidor de crescimento

de grão, aumentando a homogeneidade da microestrutura, o que eleva a resistência mecânica. Já o óxido de cromo (Cr_2O_3) contribui para maior dureza, resistência mecânica e formação de uma camada apassivadora na superfície, reduzindo a oxidação em condições de altas temperaturas (Stephenson; Agapiou, 2016). O Quadro 5 apresenta o tipo de efeito provocado no desempenho da ferramenta a partir dos componentes químicos utilizados na dopagem.

Quadro 5 – Comparativo entre ferramentas de metal duro e cerâmicas

Composição + Componente de Dopagem	Efeito Provocado na Ferramenta
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$	Inibe o crescimento dos grãos, aumentando a homogeneidade da microestrutura e melhorando a resistência mecânica.
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$	Aumenta a dureza e a resistência mecânica; forma uma camada apassivadora que reduz a oxidação em altas temperaturas.
Al_2O_3 puro	Alta dureza e estabilidade térmica, mas baixa tenacidade, sensível a choques mecânicos e térmicos.
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$	Melhora a resistência ao desgaste abrasivo e ao desgaste por craterização, indicado para aços com alta abrasividade.

Fonte: Adaptado de Stephenson e Agapiou (2016)

Essas características tornam as cerâmicas óxidas uma alternativa viável ao CBN em algumas aplicações, principalmente no torneamento de aços endurecidos com dureza entre 45 e 55 HRC, onde as ferramentas cerâmicas óxidas podem oferecer desempenho satisfatório a um custo significativamente menor. No entanto, para materiais com dureza muito elevada ou em operações de corte interrompido, o CBN ainda é a melhor opção (Sahin, 2009). Além disso, as ferramentas cerâmicas óxidas são adequadas para usinagem a seco, o que reduz custos e impactos ambientais, além de simplificar o processo produtivo.

2.5.4 Recobrimentos em Ferramentas de Corte

Os recobrimentos em ferramentas de corte têm como objetivo melhorar o desempenho do substrato base da ferramenta, aumentando a resistência ao desgaste, a dureza a quente e a estabilidade química durante a usinagem. Eles são

aplicados principalmente em ferramentas de metal duro e, em menor escala, em ferramentas de cermet, cerâmica e até aço rápido, dependendo da aplicação (Stephenson; Agapiou, 2016). O Quadro 6 apresenta os tipos de recobrimentos mais comuns utilizados:

Quadro 6 – Recobrimentos mais comuns em ferramentas de corte

Recobrimento	Fórmula	Efeito Provocado na Ferramenta
Nitreto de Titânio	TiN	Melhora a resistência ao desgaste abrasivo e reduz o atrito entre ferramenta e peça.
Nitreto de Titânio e Alumínio	TiAlN	Oferece maior resistência à oxidação e suporta temperaturas mais altas.
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	Aumenta a barreira térmica, reduzindo a transferência de calor para o substrato.
Multicamadas	TiN/TiAlN/Al ₂ O ₃	Combinam os benefícios de diferentes materiais, oferecendo maior versatilidade.

Fonte: Adaptado de Stephenson e Agapiou (2016)

Esses recobrimentos são aplicados por processos como PVD (Deposição de Vapor Física) e CVD (Deposição de Vapor Química). O processo PVD produz camadas mais finas e é mais indicado para geometrias complexas, enquanto o CVD gera camadas mais espessas, com maior resistência ao desgaste em operações pesadas (Mikula; Dobrzanski, 2007).

O uso de recobrimentos em ferramentas permite aumentar a velocidade de corte, prolongar a vida útil da ferramenta e melhorar a qualidade superficial da peça. Em operações de torneamento contínuo, uma ferramenta revestida pode apresentar desempenho até duas vezes maior em comparação com a mesma ferramenta sem recobrimento (Arulkirubakaran; Senthilkumar; Dinesh, 2017). Apesar das vantagens, os recobrimentos também têm limitações. Em operações com corte interrompido ou com vibrações excessivas, as camadas podem sofrer micro trincas ou delaminação, comprometendo o desempenho da ferramenta. Além disso, em aplicações onde a temperatura não atinge níveis elevados, o benefício do recobrimento pode ser reduzido (Sousa; Silva, 2020).

No contexto do torneamento de aços endurecidos, os recobrimentos são menos usados em ferramentas cerâmicas, já que essas ferramentas já apresentam boa resistência térmica e química intrínseca. No entanto, para ferramentas de metal

duro e cermet, os recobrimentos continuam sendo um dos recursos mais eficazes para aumentar a produtividade e a vida útil da ferramenta (Machado *et al.*, 2015).

2.6 MATERIAL USINADO: AÇO SAE 4340 ENDURECIDO

O aço SAE 4340 é um aço de baixa liga, com níquel, cromo e molibdênio, pertencente à classe dos aços ligados ao níquel-cromo-molibdênio, Ni-Cr-Mo (Smith; Hashemi, 2012). É um material muito utilizado em componentes que exigem alta resistência mecânica, boa tenacidade e capacidade de suportar choques e fadiga, como eixos, engrenagens, virabrequins e componentes estruturais na indústria automotiva e aeroespacial (da Costa; Mei, 2010).

A composição típica desse aço contém cerca de 0,4% de carbono, entre 1,65% e 2% de níquel, 0,7% a 0,9% de cromo e 0,2% a 0,3% de molibdênio, além de pequenas quantidades de manganês, silício e fósforo (da Costa; Mei, 2010). Essa combinação de elementos de liga garante boa temperabilidade e permite alcançar elevadas durezas após tratamento térmico, normalmente entre 45 e 55 HRC.

No estado endurecido, o SAE 4340 apresenta alta resistência ao desgaste e à fadiga, ao mesmo tempo que mantém uma boa tenacidade, o que o torna adequado para a fabricação de componentes críticos. No entanto, essas mesmas características aumentam a dificuldade de usinagem, já que a elevada dureza gera esforços de corte mais altos, maior geração de calor e maior desgaste da ferramenta (Suresh; Basavarajappa; Samuel, 2012).

A usinagem desse material exige ferramentas com alta dureza a quente e boa estabilidade química, como cerâmicas ou CBN, além de parâmetros de corte cuidadosamente ajustados para evitar falhas prematuras da ferramenta (SAHOO; SAHOO, 2012). Em processos de *hard turning*, o SAE 4340 endurecido é frequentemente utilizado como referência para avaliar desempenho de materiais de ferramentas, justamente por ser um desafio técnico devido à sua combinação de resistência, dureza e abrasividade (Suresh; Basavarajappa; Samuel, 2012). Essa condição torna o aço SAE 4340 um material de estudo interessante em pesquisas sobre usinabilidade, na avaliação dos efeitos de parâmetros de corte, tipos de

ferramentas e estratégias de operação sobre a qualidade superficial, o desgaste das ferramentas e a eficiência do processo como um todo.

2.7 VARIÁVEIS NO TORNEAMENTO DE AÇOS ENDURECIDOS

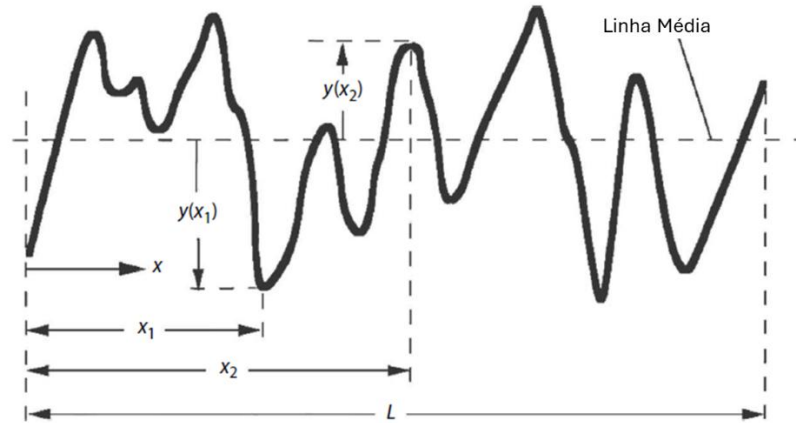
A análise das variáveis de saída é importante para a avaliação do desempenho de um processo de torneamento, especialmente para materiais de usinabilidade mais difícil, como aços endurecidos. As variáveis de saída no torneamento formam um conjunto de parâmetros que permitem medir a eficiência do corte, a qualidade da superfície usinada e o comportamento da ferramenta ao longo do tempo (Ferraresi, 2018). Entre os mais relevantes estão a rugosidade da peça, o desgaste da ferramenta, a potência de corte, a vibração e a emissão acústica. O monitoramento desses parâmetros fornece dados importantes para otimizar a operação de usinagem, aumentar a produtividade e reduzir custos com ferramentas e retrabalho de peças.

2.7.1 Rugosidade

A rugosidade é um dos principais indicadores de qualidade superficial em processos de usinagem. Ela representa as irregularidades presentes no perfil da superfície da peça após a remoção do material. Essas irregularidades podem ser resultado da geometria da ferramenta, dos parâmetros de corte, da vibração do sistema e até de fenômenos térmicos e tribológicos durante o processo (Carpinetti *et al.*, 1996). A norma ABNT NBR 4287 (ABNT, 2002) define os termos, definições e parâmetros da rugosidade como especificação da textura das superfícies.

Os parâmetros mais usados para avaliar a rugosidade são R_a (rugosidade média), R_t (rugosidade total) e R_z (altura média dos cinco maiores picos e vales). O R_a é o mais comum por ser de mais fácil medição e interpretação, mas muitas aplicações exigem também a análise de R_t e R_z para um diagnóstico mais completo do acabamento superficial (Stephenson; Agapiou, 2016). Tanto R_a como R_t são medidos em relação à linha média central, representada na Figura 4.

Figura 4 – Definição dos parâmetros utilizados para cálculo de R_a e R_t



Fonte: Stephenson; Agapiou (2016).

A equação 4 apresenta a expressão para cálculo da rugosidade média (R_a), definida como o desvio médio absoluto da superfície da peça em relação à sua linha de centro (linha média):

$$R_a = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L |y(x)| dx \quad (4)$$

Onde R_a é a rugosidade média;

x é a distância longitudinal ao longo da superfície;

L é o comprimento de amostra da superfície;

y é o desvio do perfil em relação à linha média da superfície.

A rugosidade total (R_t) é definida como a altura máxima do perfil, dada pelo desvio do pico máximo somado ao desvio da depressão máxima, sempre relação à linha de centro (linha média), conforme exposto na equação 5:

$$R_t = \max \{ y(x) \} + \min \{ |y(x)| \} \quad (5)$$

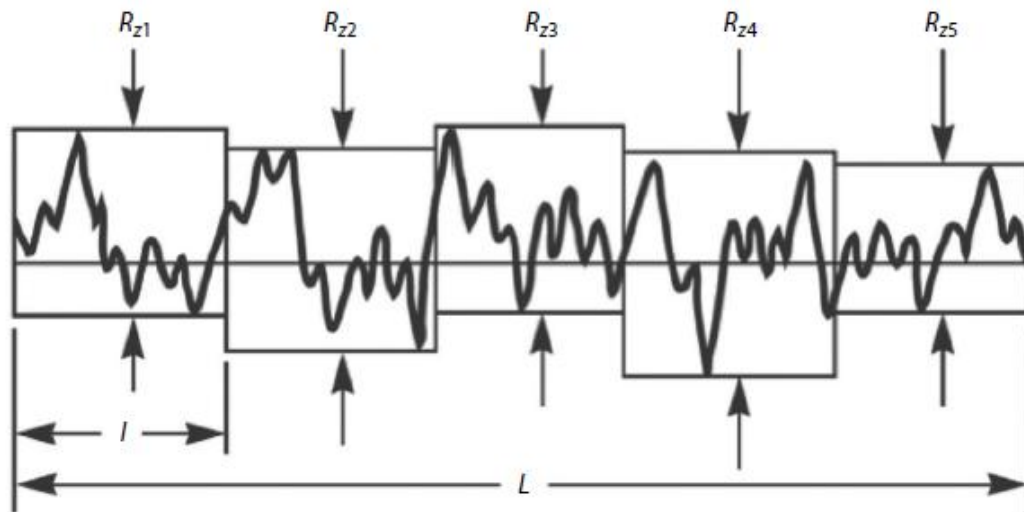
Onde R_t é a rugosidade total;

x é a distância longitudinal ao longo da superfície;

y é o desvio do perfil em relação à linha média da superfície.

Por outro lado, o parâmetro R_z (altura máxima média) é a média das cinco diferenças entre os picos mais altos e as depressões mais profundas em cinco diferentes comprimentos de amostragem, como apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Definição da altura máxima média (R_z)



Fonte: Stephenson; Agapiou (2016).

A altura máxima média (R_z) é calculada conforme expresso na equação 6:

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{zi} \quad (6)$$

Onde R_z é a altura máxima média;

R_{zi} é a altura máxima do perfil no comprimento i .

Quanto maior a rugosidade, ou seja, quanto maiores forem os valores de R_a , R_t , e R_z , pior é o acabamento superficial. No torneamento de aços endurecidos, a rugosidade superficial está diretamente relacionada aos parâmetros de corte e à condição da ferramenta. Avanços mais altos tendem a aumentar os valores de R_a , R_t e R_z , enquanto velocidades de corte mais elevadas, quando adequadamente combinadas, podem melhorar o acabamento (Lima; Corrêa, 2002).

Por outro lado, ferramentas desgastadas ou com aresta lascada geram superfícies com maior irregularidade. Dessa forma, a avaliação da rugosidade é importante não só para garantir a qualidade do produto final, mas também para monitorar indiretamente o estado da ferramenta e a estabilidade do processo (Sahu; Choudhury, 2015). Superfícies com rugosidade fora do padrão podem indicar falhas no ajuste de parâmetros ou desgaste excessivo da ferramenta, permitindo ações corretivas antes que ocorram problemas maiores.

2.7.2 Desgaste da Ferramenta

O desgaste da ferramenta é um dos principais fatores que limitam a eficiência do torneamento, afetando negativamente a qualidade da operação. O desgaste ocorre devido à interação mecânica, térmica e química entre a ferramenta, o cavaco e a peça durante o corte. Trata-se de um fenômeno que afeta diretamente a vida útil da ferramenta, diminui a qualidade superficial da peça e impacta negativamente a estabilidade do processo (Ferraresi, 2018).

Os mecanismos de desgaste mais comuns são a abrasão, causada por partículas duras presentes no material usinado; a adesão, que ocorre quando fragmentos do material da peça se unem ao material da ferramenta; e a difusão, que ocorre pela migração de elementos químicos em altas temperaturas (Stephenson; Agapiou, 2016). Além destes, também podem ocorrer desgaste por oxidação e fratura mecânica, dependendo das condições de usinagem e do tipo de material da ferramenta.

O desgaste normalmente se manifesta em regiões específicas da aresta de corte, como o flanco (desgaste de flanco, V_b) e a face da ferramenta (desgaste em cratera, K_T). O desgaste de flanco é o mais monitorado, pois afeta diretamente a qualidade da superfície da peça e o esforço de corte, como será mais detalhado a seguir, no item 2.8 desta revisão.

O controle do desgaste é um parâmetro necessário para garantir produtividade e qualidade no torneamento. Ele pode ser monitorado por inspeções periódicas da ferramenta, medições dimensionais da peça, variação da rugosidade ou uso de técnicas indiretas, como análise de vibração ou emissão acústica (Ferraresi,

2018). A coleta destes dados permite planejar trocas preventivas de ferramentas, evitando falhas inesperadas e paradas não programadas.

2.7.3 Potência de Corte

A potência de corte é a quantidade de energia necessária para remover o material durante o processo de usinagem. Ela é um indicador direto da força de corte e está relacionada ao volume de material removido por unidade de tempo (Trent; Wright, 2000). Esse parâmetro é importante porque afeta o consumo de energia, o aquecimento do sistema e o desgaste da ferramenta. A norma ABNT NBR 12545 (ABNT, 1991) trata da terminologia relacionada aos conceitos da técnica de usinagem, definindo os termos sobre forças, energia, trabalho e potência envolvidos nesse processo.

O cálculo da potência de corte é feito a partir da força de corte principal e da velocidade de corte. Valores mais altos de potência indicam condições de corte mais severas, que podem acelerar o desgaste da ferramenta e gerar problemas de estabilidade no processo. A potência útil de corte (P_{UC}) pode ser calculada conforme expresso na equação 7:

$$P_{UC} = \frac{F_C \cdot V_C}{60 \cdot 10^3} \quad (7)$$

Onde P_{UC} é a potência útil de corte, em kW;

F_C é a força de corte, em N;

V_C é a velocidade de corte, em m/min.

A potência também está diretamente ligada aos diferentes parâmetros de usinagem. Velocidades de corte maiores, avanços mais altos ou profundidades de corte maiores aumentam a energia necessária para o corte (Trent; Wright, 2000). Dessa forma, ajustes adequados desses parâmetros podem otimizar a potência consumida, mantendo a produtividade e reduzindo o impacto sobre a ferramenta. A potência efetiva de corte (P_C) pode ser calculada por meio de parâmetros de usinagem mais detalhados, conforme expresso na equação 8:

$$P_C = \frac{ap \cdot f \cdot V_C \cdot K_C}{60 \cdot 10^3 \cdot \eta} \quad (8)$$

Onde P_C é a potência efetiva de corte, em kW;
 ap é a profundidade de corte, em mm;
 f é o avanço por rotação, em mm/rotação;
 V_C é a velocidade de corte, em m/min;
 K_C é o coeficiente de força específica de corte, em MPa;
 η é o coeficiente da eficiência da máquina.

A potência de corte é um dos parâmetros cujo monitoramento regular é uma prática comum em pesquisas de usinagem e em ambientes industriais. Esse monitoramento permite avaliar a eficiência do processo, identificar desvios operacionais e até inferir o estado da ferramenta, já que um aumento inesperado na potência pode indicar desgaste excessivo ou problemas de afiação (Stephenson; Agapiou, 2016).

2.7.4 Vibração

A vibração no torneamento é um fenômeno indesejado que afeta a qualidade do processo de usinagem e a vida útil da ferramenta (Ferraresi, 2018). A vibração ocorre devido à dinâmica da interação entre a máquina, a ferramenta, a peça e as forças de corte envolvidas. Algumas pequenas variações na rigidez do sistema ou no avanço da ferramenta podem gerar oscilações que se amplificam durante a operação de usinagem (Sharma; Pandey, 2016).

As vibrações podem ser classificadas em vibrações forçadas e vibrações autoexcitadas. As vibrações forçadas acontecem devido a fontes externas, como desbalanceamento da peça, folgas nos componentes da máquina ou irregularidades no material. Por outro lado, as vibrações autoexcitadas, também chamadas de *chatter*, são mais críticas, pois são geradas pela própria operação, se mantêm e aumentam ao longo do processo, comprometendo a estabilidade da usinagem (Vikram *et al.*, 2016).

Os efeitos das vibrações são variados e incluem o aumento da rugosidade superficial, desgaste acelerado da ferramenta e até fraturas da aresta de corte. Além disso, vibrações severas comprometem a precisão dimensional da peça e reduzem a produtividade (Ferraresi, 2018).

O controle da vibração depende de fatores como rigidez da máquina, fixação adequada da peça e da ferramenta, ajuste dos parâmetros de corte e, em alguns casos, uso de amortecedores ou suportes especiais (Mohadi *et al.*, 2015; Weremczuk *et al.*, 2015). O monitoramento das vibrações, por meio de acelerômetros ou sensores dedicados, é uma prática cada vez mais comum, tanto em estudos experimentais quanto em processos industriais, pois ajuda a identificar problemas no início e a ajustar as condições de usinagem antes que ocorram falhas mais graves.

2.7.5 Emissão acústica

A emissão acústica é um fenômeno que ocorre durante o corte devido à liberação de energia na forma de ondas sonoras de alta frequência. Essas ondas são geradas por processos como deformação plástica, fricção entre o cavaco e ferramenta, formação e quebra do cavaco, além do início de trincas na aresta de corte (Ferraresi, 2018).

O monitoramento da emissão acústica tem se mostrado uma técnica eficiente para analisar e controlar o processo de usinagem (Guo; Ammala, 2005). O nível de emissões acústicas permite detectar alterações sutis no comportamento do corte, muitas vezes antes que essas alterações sejam perceptíveis por outros métodos. Por isso, o nível de emissões acústicas é um parâmetro importante para o acompanhamento em tempo real do desgaste da ferramenta, da formação de vibrações e da qualidade da superfície usinada.

Sensores piezoelétricos são os mais usados para capturar os sinais de emissão acústica (Govekar *et al.*, 2000). Esses sinais são processados para identificar padrões que indicam condições específicas, como início de lascamento da ferramenta, formação de chatter ou falhas no avanço da peça.

Além de auxiliar no diagnóstico do processo, a emissão acústica contribui para o desenvolvimento de sistemas de manufatura inteligente (Liu *et al.*, 2024). Ao

integrar esses sensores com algoritmos de análise, é possível implementar estratégias de manutenção preditiva, reduzindo paradas não programadas e otimizando a vida útil das ferramentas.

2.8 DESGASTE E AVARIAS NAS FERRAMENTAS DE CORTE

O desgaste das ferramentas de corte é um fenômeno inevitável no processo de usinagem. Ele ocorre devido à combinação de fatores mecânicos, térmicos e químicos na interface entre a ferramenta, o cavaco e a peça (Ferraresi, 2018). A compreensão desses fenômenos é essencial para aumentar a produtividade, melhorar a qualidade superficial das peças e reduzir custos.

O desgaste pode ser classificado em diferentes tipos, dependendo da região da ferramenta onde ele ocorre e do mecanismo causador predominante (Stephenson; Agapiou, 2016). O desgaste de flanco é o mais comum e está associado à abrasão causada pelo contato contínuo com a superfície da peça. O desgaste em cratera ocorre na face da ferramenta, devido à alta temperatura e ao atrito com o cavaco, sendo mais comum em condições de corte severas. Outros mecanismos importantes incluem o desgaste por difusão, quando há migração de elementos da ferramenta para o cavaco em temperaturas elevadas, e o desgaste por oxidação, provocado pela reação com o oxigênio do ar. O Quadro 7 apresenta os principais tipos de desgaste, os mecanismos envolvidos, as características e possíveis contramedidas a adotar.

Quadro 7 – Tipos de desgaste, características e contramedidas

Tipo de desgaste	Mecanismo	Características	Contramedidas
Desgaste de flanco	Abrasão	Marca de desgaste uniforme	Usar material de ferramenta mais duro; usar ferramenta revestida; filtrar fluido de corte; limpar peças; refinar microestrutura da peça
	Amolecimento térmico		Reduzir avanço; reduzir velocidade
	Corte acima da altura do centro	Acabamento deficiente	Verificar altura do inserto
	Deformação da aresta	Aresta deformada	Reduzir velocidade de corte; usar ferramenta mais dura
	Avanço muito baixo	Acabamento deficiente	Aumentar avanço

(continua)

Quadro 7 – Tipos de desgaste, características e contramedidas (conclusão)

Tipo de desgaste	Mecanismo	Características	Contramedidas
Desgaste de flanco	Abrasão	Marca de desgaste uniforme	Usar material de ferramenta mais duro; usar ferramenta revestida; filtrar fluido de corte; limpar peças; refinar microestrutura da peça
	Amolecimento térmico		Reduzir avanço; reduzir velocidade
	Corte acima da altura do centro	Acabamento deficiente	Verificar altura do inserto
	Deformação da aresta	Aresta deformada	Reduzir velocidade de corte; usar ferramenta mais dura
	Avanço muito baixo	Acabamento deficiente	Aumentar avanço
Desgaste em cratera	Difusão	Taxa de desgaste rápida	Reduzir velocidade de corte; melhorar capacidade de refrigeração do fluido; aumentar volume e pressão do fluido; direcionar fluido para a interface cavaco/ferramenta
	Desgaste químico	Marca de desgaste lisa	Alterar material ou revestimento da ferramenta, ou fluido
	Avanço muito baixo	Acabamento deficiente	Aumentar avanço
Desgaste em entalhe	Abrasão	Ocorre na superfície livre da peça	Variar profundidade de corte; usar ferramenta mais dura; aumentar ângulo de posição
	Oxidação	Descoloração	Alterar fluido; reduzir velocidade; alterar material ou revestimento da ferramenta
Desgaste do raio de ponta	Abrasão	Marca áspera e irregular	Reduzir avanço; usar ferramenta mais dura

Fonte: Adaptado de Stephenson e Agapiou (2016)

Além do desgaste progressivo, podem ocorrer avarias súbitas, como lascamento, fratura da aresta de corte ou deformação plástica. Essas falhas costumam estar associadas a vibrações excessivas, cortes interrompidos, parâmetros inadequados de usinagem ou ainda à baixa tenacidade do material da ferramenta (El Wardany; Elbestawi, 1997). Diferente do desgaste gradual, essas avarias comprometem imediatamente a qualidade da peça e podem até danificar a máquina ou o dispositivo de fixação.

O controle do desgaste e das avarias envolve a escolha correta do material da ferramenta, o ajuste dos parâmetros de corte, o uso de recobrimentos e estratégias de refrigeração, quando aplicável. O monitoramento periódico, por meio de inspeções visuais, medições de desgaste ou métodos indiretos, permite prever a vida útil da ferramenta e planejar trocas preventivas (Maia *et al.*, 2015).

A norma ISO 3685 estabelece critérios padronizados para a medição do desgaste e para a determinação do fim de vida da ferramenta (ISO, 1993). Esses critérios são amplamente adotados em pesquisas e na indústria, servindo como referência para a comparação de desempenho entre diferentes materiais de ferramentas e diferentes condições de corte.

No torneamento do aço SAE 4340 endurecido, o desgaste da ferramenta é mais severo do que em materiais de menor dureza. A alta resistência mecânica deste aço, combinada com a abrasividade de sua microestrutura martensítica, gera esforços de corte elevados e temperaturas altas na zona de usinagem (Cappellini; Abeni, 2022). Nessas condições, se aceleram os mecanismos de desgaste, o que exige ferramentas com alta dureza a quente e estabilidade química, como as cerâmicas óxidas.

As ferramentas cerâmicas óxidas, apesar de apresentarem excelente resistência ao desgaste abrasivo e estabilidade térmica, são frágeis a choques mecânicos e térmicos. Assim, quando submetidas a operações com corte interrompido, vibrações excessivas ou variações bruscas de carga, podem sofrer avarias súbitas, como lascamento da aresta ou até fratura total (Zhao; Yuan; Zhou, 2010).

Os mecanismos de desgaste mais observados nesse contexto são: o desgaste de flanco, causado pela abrasão contínua da superfície endurecida da peça contra a aresta de corte; o desgaste por difusão, resultante da migração de elementos químicos da ferramenta para o cavaco devido às temperaturas elevadas; e o desgaste por oxidação, que ocorre em processos a seco e em velocidades de corte mais altas, favorecendo reações químicas na interface (Chakraborty *et al.*, 2008).

Quando as condições de corte são estáveis e estão bem ajustadas, o desgaste tende a ser gradual e previsível, permitindo um melhor controle da vida útil da ferramenta. Por outro lado, parâmetros inadequados, como avanço excessivo ou baixa rigidez no sistema máquina-peça-ferramenta, podem acelerar o processo de desgaste e levar a falhas prematuras. Esse risco reforça a importância de monitorar as variáveis de saída, como rugosidade da peça, potência de corte, vibração e emissões acústicas (Li, 2002), que servem como indicadores indiretos do estado da ferramenta.

2.9 ASPECTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

Os aspectos econômicos e ambientais têm um papel importante na escolha dos materiais da ferramenta e dos parâmetros de usinagem. No torneamento de aços endurecidos, esses fatores são ainda mais relevantes, pois as condições de corte severas resultam em ferramentas de alto custo e elevado consumo de energia (Ferraresi, 2018).

Do ponto de vista econômico, o uso de ferramentas cerâmicas óxidas se destaca por apresentar custo inferior ao do CBN, mantendo um desempenho adequado em muitas aplicações. A diferença de preço permite reduzir os custos por peça, especialmente em lotes pequenos e médios. Além disso, a possibilidade de operar em altas velocidades de corte aumenta a produtividade e reduz o tempo de máquina, gerando economia no processo (Seleznev *et al.*, 2021). No contexto do torneamento do aço SAE 4340 endurecido, as ferramentas cerâmicas óxidas apresentam uma alternativa viável, unindo desempenho adequado e redução de custos operacionais em comparação com opções como o CBN, desde que as condições de corte sejam bem definidas e controladas.

Outro ponto importante é a usinagem a seco, viabilizada pelas ferramentas cerâmicas. A ausência de fluido de corte elimina custos com aquisição, manutenção e descarte desses produtos, que podem representar uma parcela significativa no custo total de usinagem (Pimenov *et al.*, 2021). Também reduz o tempo de limpeza das peças e da máquina, simplificando a operação.

Sob o aspecto ambiental, a usinagem a seco traz vantagens evidentes. Ela elimina a geração de resíduos associados aos fluidos de corte e reduz o consumo de água e de produtos químicos (Ahmad *et al.*, 2021). Esses fatores contribuem para processos mais sustentáveis e estão alinhados com as exigências ambientais e de saúde ocupacional nas indústrias modernas. Por outro lado, a usinagem a seco exige maior controle dos parâmetros de corte e boa rigidez no sistema máquina-ferramenta, para evitar desgaste acelerado e falhas prematuras (Pawanr; Gupta, 2024). Assim, o equilíbrio entre desempenho técnico, custo e impacto ambiental deve sempre ser avaliado para cada aplicação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto de pesquisa foi desenvolvido no Laboratório de Estudo da Usinagem na Unesp-Guaratinguetá, utilizando Centro de Torneamento CNC Romi modelo GL 240M (Figura 6) para o qual montado um sistema de aquisição de dados.

Figura 6 – Centro de Torneamento CNC Romi modelo GL 240M.



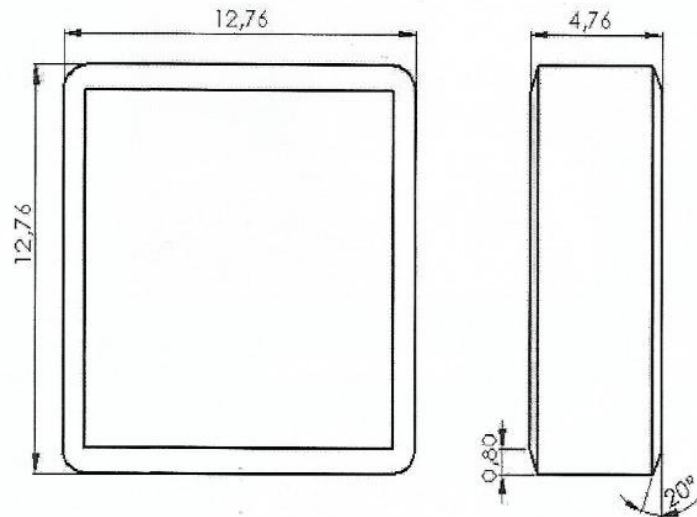
Fonte: Autor (2025).

Foram testadas duas ferramentas cerâmicas experimentais: Ferramentas cerâmicas $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ e $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ (Ferramenta 1: com 99,00% de Al_2O_3 e 1,00% de Cr_2O_3 (ferramenta na cor rosa), Ferramenta 2 : composta por 99,75% de Al_2O_3 e 0,25% de MgO (ferramenta na cor branca). As ferramentas utilizadas possuem código SNGN120408, de acordo com a norma ISO 1832, com dimensão de 12,76 x 12,76 x 4,76 mm, *chamfer* de 20° e raio de 0,8 mm. O código SNGN120408 significa:

- S: formato do inserto (S = quadrado);
- N: ângulo de folga (N = neutro, 0°);
- G: tolerância;
- N: tipo de fixação;
- 12: dimensão (lado de 12,76 mm);
- 04: espessura (4,76 mm);
- 08: raio de ponta (0,8 mm).

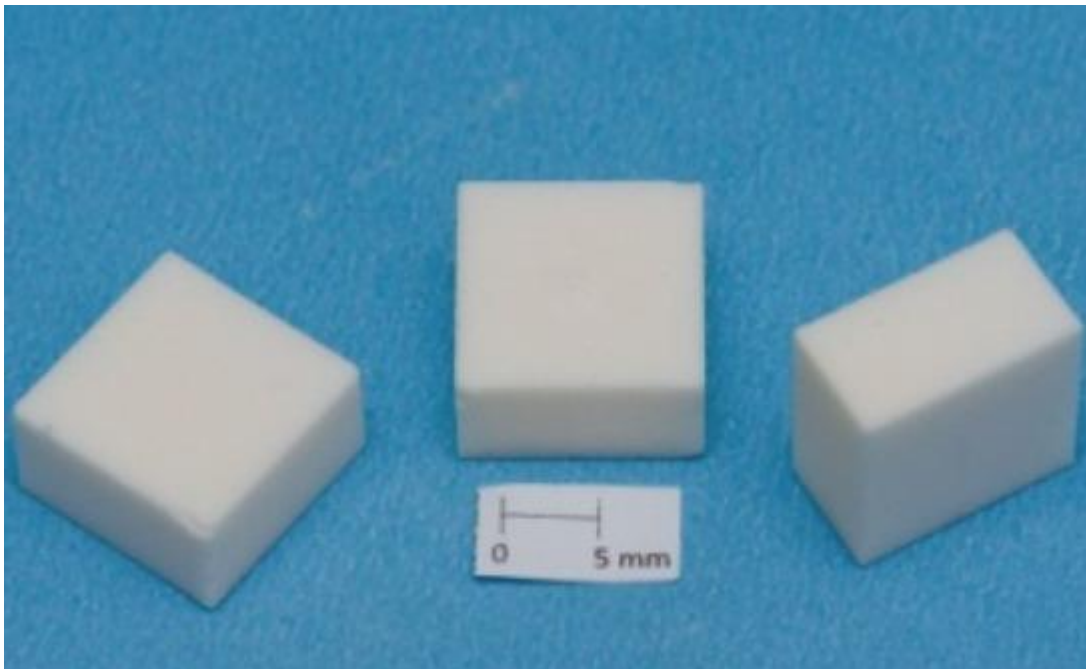
A Figura 7 apresenta a geometria das ferramentas utilizadas no ensaio, enquanto a Figura 8 apresenta fotos da ferramenta de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$.

Figura 7 – Geometria da ferramenta, código SNGN120408.



Fonte: Autor (2025).

Figura 8 – Fotografia da ferramenta cerâmica óxida de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$



Fonte: Autor (2025).

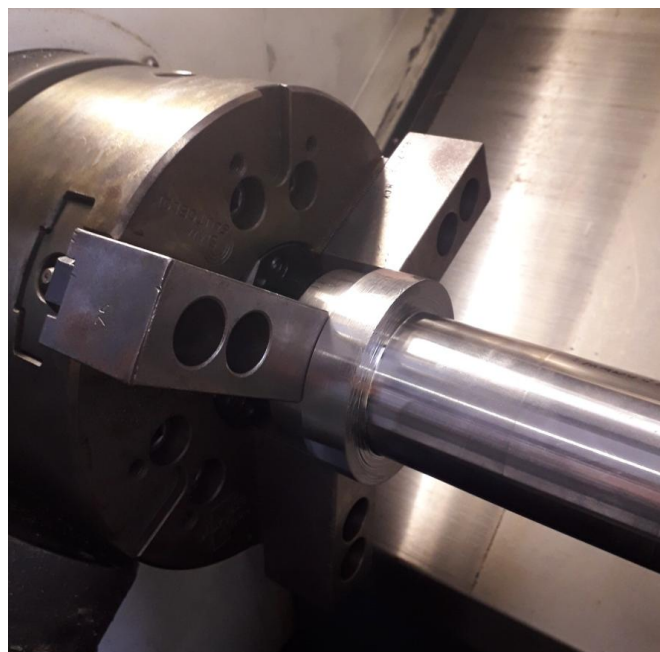
Foi utilizado como corpo de prova o aço SAE 4340, temperado e revenido, cujas dimensões foram $\varnothing 70 \times 200 \text{ mm}$ (Figura 7), com dureza de 56 HRC. Os parâmetros de corte utilizados foram: avanço de 0,05 e 0,1 mm/rot (f) e profundidade de corte de 0,15 (a_p), percurso de avanço de 50mm. Estes parâmetros foram escolhidos por ser valores comuns em operações de acabamento. As velocidades de corte (V_c) utilizadas foram 100, 150, 200m/min. Foram realizadas duas repetições. O planejamento utilizado foi o fatorial completo com duas repetições, sendo realizados 24 ensaios.

Tabela 1 – Variáveis de entrada

Parâmetro	Valores
Ferramentas	Al ₂ O ₃ -MgO e Al ₂ O ₃ -Cr ₂ O ₃
Velocidade de corte (m/min)	100, 150 e 200
Profundidade de corte (mm)	0,15
Avanço (mm/rot)	0,05 e 0,1
Comprimento de avanço (mm)	50

Fonte: Autor (2025).

Figura 9 – Corpo de prova



Fonte: Autor (2025).

3.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Durante o processo de usinagem foram coletados dados de potência, vibração e emissão acústica com o auxílio de um sistema de aquisição de dados computadorizado (Figura 10), o qual coletou os dados do processo em tempo real. Esse sistema permite a obtenção de quaisquer variáveis físicas que, mediante sensores ou transdutores apropriados, são convertidos em sinais elétricos proporcionais.

Para isto foi utilizado um aplicativo desenvolvido que realiza a aquisição dos dados com uma taxa de 4800 pontos por segundo. Este programa foi desenvolvido através da plataforma do software Labview 7.1 2012, da National Instruments. O sistema ainda contou com uma placa de aquisição de dados da mesma empresa do software, modelo NI PCI 6220, que foi acoplada no computador. A placa teve a função de receber os sinais analógicos enviado dos sensores acoplados ao centro de usinagem e transformá-los em sinais digitais para serem interpretados pelo software.

Figura 10 – Sistema de aquisição de dados



Fonte: Autor (2025).

3.2 POTÊNCIA CONSUMIDA

Para a aquisição da potência consumida do motor do centro de torneamento foi utilizado um sensor de corrente, da marca LEM modelo AT 100 B10 (Figura 11).

Figura 11 – Sensor de corrente, marca LEM, modelo AT 100 B10



Fonte: Autor (2025).

O sensor em função da corrente elétrica de uma das fases do motor gera uma saída proporcional de 0 a 10 Volts de Corrente Contínua (U_{CC}), que é armazenada pelo computador. Como o sinal adquirido pelo sistema tem uma saída proporcional em volts é necessário converter o valor para Ampères. O fabricante do sensor fornece a Equação 9 para a transformação do dado adquirido em volts para Ampères.

$$I = U_{CC} * 10 \quad (9)$$

Onde I é a corrente de uma das fases, em Ampères;

U_{CC} é a tensão de corrente contínua, em Volts.

Substituindo o valor da corrente, o valor da tensão de fase do motor do centro de usinagem (220 V) e o fator de potência (0,92) do motor, na Equação 10 que foi utilizada para transformar o sinal adquirido em Volts para potência consumida em watts e, multiplicado toda a equação por $\sqrt{3}$, visto que motor utilizado é trifásico, obtêm-se a Equação 11.

$$P_c = I \times U_f \times F_p \times \sqrt{3} \quad (10)$$

Onde P_c é a potência consumida, em Watts;

I é a corrente alternada de uma das fases, em Ampères;

U_f é a tensão de uma das fases, em Volts;

F_p é o fator de potência.

$$P_c = U_{cc} * 10 * 0,92 * 220 * \sqrt{3} \quad (11)$$

3.3 VIBRAÇÃO

Para a aquisição dos valores de vibração, foi utilizado um sensor piezelétrico (acelerômetro) e um amplificador de sinal com saída retificada em RMS (valor quadrático médio), marca Vibro Control, modelo TV100 (Figura 12).

Figura 12 – Sensor piezelétrico, marca VibroControl, modelo TV100



Fonte: Autor (2025).

Os valores obtidos em VCC foram convertidos depois para valores de velocidade em mm/s através da Equação 12, fornecida pelo fabricante.

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

3.4 EMISSÃO ACÚSTICA

Para a aquisição da emissão acústica foi usado um módulo de emissão acústica composto por um sensor (piezoelétrico) e um amplificador de sinal elétrico com saída retificada em RMS (valor quadrático médio), marca PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, modelo do sensor R15A, modelo do amplificador de sinal 1272-1000 (Figura 13).

Figura 13 – Módulo emissão acústica (1), sensor (2) e amplificador (3).



Fonte: Autor (2025).

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

3.5 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

Para a avaliação da qualidade superficial das peças através da rugosidade foi utilizado um rugosímetro da marca Mahr modelo Marsurf M300 (Figura 14), com ponta apalpadora em formato de cone esférico feita de diamante e com raio de ponta de 2 μm . Para esta análise foram utilizados os parâmetros R_a e R_t , com comprimento de amostragem adotado (*cut-off*) de 0,25 mm.

Figura 14 – Rugosímetro marca Mahr modelo Marsurf M300



Fonte: Autor (2025).

Foram realizadas no total 3 medidas de rugosidade em cada sequência de usinagem. Os parâmetros analisados foram os valores de R_a (Rugosidade média) e R_t (Rugosidade total).

3.6 DESGASTE DAS FERRAMENTAS E ANÁLISE DE CAVACOS

Foi realizada a determinação do desgaste das ferramentas, identificando qual seria o tipo de avaria que ocorreu devido aos esforços na usinagem. Para isso, foi utilizado o estereoscópio da Marca Mahr, modelo MarVision MM20 (Figura 15).

Figura 15 – Estereoscópico da Marca Mahr, modelo MarVision MM200



Fonte: Autor (2025).

Para a análise estatística foi realizada uma análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey, ambos com 95% de confiabilidade.

Os dados obtidos de potência de corte, emissão e vibração foram tratados através do Software Matlab, obtendo-se o valor médio a cada segundo de usinagem. Após isso, esses dados, juntamente com dados de rugosidade e desgaste foram tratados estatisticamente com o software MINITAB®. O tratamento compreendeu as análises estatísticas de variância (ANOVA), testes de normalidade de Anderson-Darling e Teste de Tukey, de acordo com o planejamento experimental adotado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nos ensaios de torneamento do aço SAE 4340 endurecido com as ferramentas cerâmicas óxidas dopadas com óxido de magnésio ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) e óxido de cromo ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$) foram analisados estatisticamente com o auxílio do software Minitab®, considerando um nível de confiança de 95%. As variáveis de saída avaliadas foram: potência consumida, vibração, emissão acústica, rugosidade média (R_a), rugosidade total (R_t) e desgaste específico do flanco (V_b/L_c).

A análise dos resultados foi conduzida com base na metodologia de Análise de Variância (ANOVA), que permite identificar a influência dos parâmetros de usinagem e das interações entre eles sobre as variáveis de resposta. O valor de significância (p-valor) foi utilizado como critério para determinar a relevância estatística dos fatores, adotando-se como referência $\alpha = 0,05$. Fatores com $p < 0,05$ foram considerados estatisticamente significativos.

Além disso, os gráficos de efeitos principais e de interações foram empregados para ilustrar as tendências de comportamento de cada variável, possibilitando a compreensão de que forma a velocidade de corte (V_c), o avanço (f) e o tipo de ferramenta influenciaram o desempenho do processo.

Embora todos os parâmetros tenham sido avaliados, ênfase especial foi dada às análises de rugosidade média (R_a), rugosidade total (R_t) e desgaste específico do flanco (V_b/L_c), porque estas representam diretamente a qualidade superficial da peça usinada e a durabilidade das ferramentas, ou seja, aspectos críticos para a viabilidade técnica e econômica do torneamento de aços endurecidos.

Nos tópicos seguintes são apresentados, de forma individual, os resultados referentes a cada variável de saída, acompanhados de suas tabelas de ANOVA e respectivos gráficos, seguidos da discussão dos efeitos observados.

4.1 POTÊNCIA

A potência consumida durante o processo de usinagem é um parâmetro importante para avaliar a eficiência do corte e o comportamento da ferramenta sob diferentes condições de operação. A potência reflete diretamente o esforço necessário para remover o material e está relacionada à força de corte, ao coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta e à dureza do material usinado. Assim, a análise da

potência permite identificar condições de usinagem mais estáveis e energeticamente mais eficientes, auxiliando também na estimativa indireta do desgaste da ferramenta.

A Tabela 2 apresenta a análise de variância (ANOVA) para a potência consumida. O objetivo foi avaliar a influência da velocidade de corte (V_c), do avanço (f) e do tipo de ferramenta sobre o consumo de potência durante o torneamento do aço SAE 4340 endurecido.

Tabela 2 – Análise de Variância da Potência

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	11	147898	13445,3	29,45	0,000
Linear	4	142018	35504,6	77,77	0,000
Ferramenta	1	33189	33188,5	72,69	0,000
V_c (m/s)	2	31205	15602,7	34,17	0,000
f (mm/rot)	1	77624	77624,3	170,02	0,000
Interações de 2 fatores	5	4891	978,1	2,14	0,130
Ferramenta* V_c (m/s)	2	1620	810,1	1,77	0,211
Ferramenta* f (mm/rot)	1	2196	2195,6	4,81	0,049
V_c (m/s)* f (mm/rot)	2	1075	537,4	1,18	0,341
Interações de 3 fatores	2	989	494,7	1,08	0,369
Ferramenta* V_c (m/s)* f (mm/rot)	2	989	494,7	1,08	0,369
Erro	12	5479	456,6		
Total	23	153377			

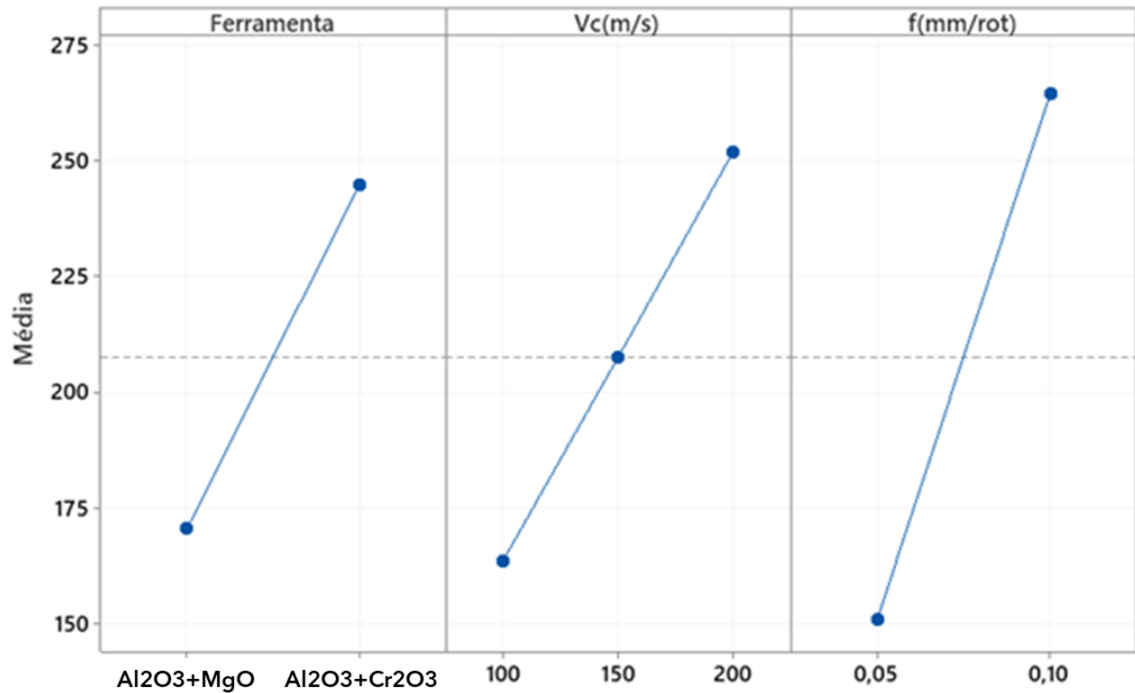
Fonte: Autor (2025).

Observa-se que tanto o avanço (f), como a ferramenta e a velocidade de corte apresentaram valores de p menores do que 0,05, sendo todos significativos na influência sobre a potência de usinagem. A maior parte da influência sobre a potência de corte é causada pelo avanço que, sozinho, responde por mais de 50% da variância da potência, como pode ser visto pelos valores de SQ (Aj.). Isso era esperado, já que o aumento do avanço eleva a espessura do cavaco e, conseqüentemente, aumenta a força e a energia necessárias para o corte. A ferramenta e a velocidade de corte (V_c) também apresentaram influências significativas, mas de menor intensidade (21,6% e 20,3%, respectivamente).

Foram verificadas ainda interações secundárias entre a ferramenta e o avanço (f), impactando conjuntamente e de maneira significativa a potência de usinagem. Essa interação entre avanço e tipo de ferramenta indica que o comportamento da potência não depende apenas dos parâmetros isolados, mas também da combinação entre eles. Esse resultado demonstra que cada tipo de

ferramenta responde de forma distinta às variações de avanço, o que está relacionado à sua composição e estabilidade térmica.

Figura 16 – Gráfico de Efeitos Principais para Potência (W)



Fonte: Autor (2025).

A Figura 16 com o gráfico de efeitos principais para a potência consumida mostra que, conforme o avanço aumenta, há um crescimento expressivo da potência requerida pelo processo. Isso ocorre porque maiores avanços implicam remoção de maior volume de material por unidade de tempo, exigindo mais energia do sistema. Já o aumento da velocidade de corte também tende a aumentar a potência, mas causando um crescimento em menor proporção do que o avanço.

Em relação ao tipo de ferramenta, nota-se que a ferramenta óxida dopada com Cr₂O₃ apresentou maiores valores médios de potência, indicando pior desempenho energético em comparação à ferramenta dopada com MgO. Essa diferença está associada à maior estabilidade química, que reduz o atrito na interface cavaco-ferramenta e a energia dissipada em calor.

4.2 VIBRAÇÃO

A vibração é um dos principais indicadores da estabilidade do processo de usinagem. Durante o torneamento, oscilações entre a ferramenta, a peça e o cavaco podem afetar diretamente a qualidade superficial, a vida útil da ferramenta e a precisão dimensional da peça. Vibrações excessivas geram irregularidades no corte, promovem desgaste prematuro e podem até causar fratura da ferramenta, especialmente em materiais cerâmicos, que apresentam baixa tenacidade.

A Tabela 3 apresenta a análise de variância (ANOVA) para o parâmetro de vibração, considerando os fatores velocidade de corte (V_c), avanço (f) e tipo de ferramenta. Observa-se que os três fatores foram significativos, todos com valor p abaixo de 0,05. Além disso, os fatores que mais contribuem para a vibração são o tipo de ferramenta e o avanço, que influenciam respectivamente 43,5 e 43,0% da variância desse parâmetro. Isso ocorre devido a diferenças na rigidez e no comportamento térmico entre as duas composições cerâmicas e porque o avanço tem influência nas forças dinâmicas sobre o sistema ferramenta-peça.

Tabela 3 – Análise de Variância da Vibração.

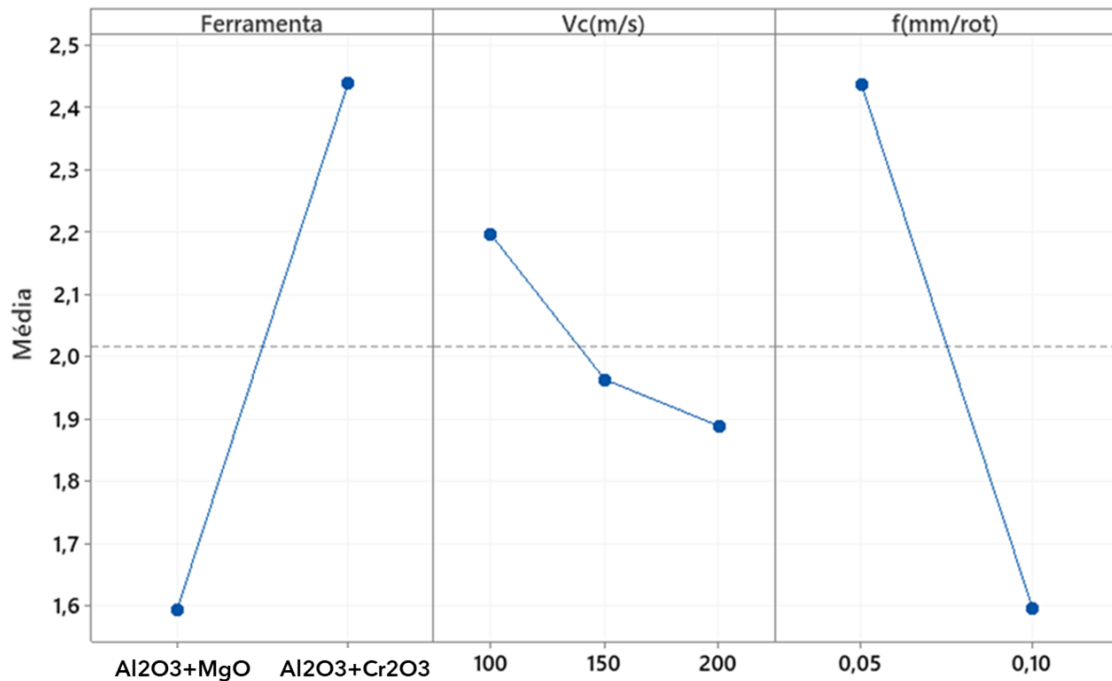
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	11	9,55418	0,86856	35,60	0,000
Linear	4	8,94465	2,23616	91,66	0,000
Ferramenta	1	4,28965	4,28965	175,83	0,000
V_c (m/s)	2	0,41275	0,20638	8,46	0,005
f (mm/rot)	1	4,24224	4,24224	173,88	0,000
Interações de 2 fatores	5	0,49410	0,09882	4,05	0,022
Ferramenta* V_c (m/s)	2	0,11679	0,05840	2,39	0,133
Ferramenta* f (mm/rot)	1	0,31764	0,31764	13,02	0,004
V_c (m/s)* f (mm/rot)	2	0,05967	0,02984	1,22	0,329
Interações de 3 fatores	2	0,11543	0,05771	2,37	0,136
Ferramenta* V_c (m/s)* f (mm/rot)	2	0,11543	0,05771	2,37	0,136
Erro	12	0,29276	0,02440		
Total	23	9,84694			

Fonte: Autor (2025).

A velocidade de corte também apresentou influência significativa, embora bem menos intensa, indicando que, em velocidades mais altas, há tendência de redução das vibrações devido à formação de cavacos mais uniformes e à diminuição das forças de atrito.

A interação entre avanço e tipo de ferramenta mostrou-se estatisticamente significativa, indicando que cada ferramenta reage de maneira diferente ao aumento das forças dinâmicas do processo.

Figura 18 – Gráfico de Efeitos Principais para Vibração (m/s)

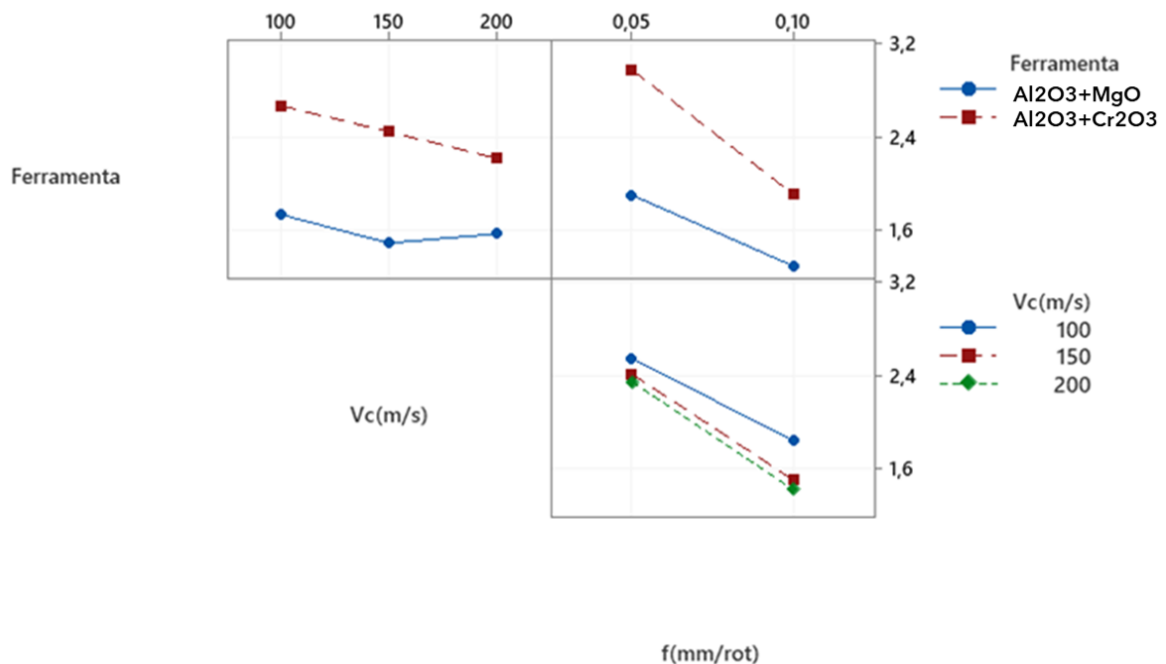


Fonte: Autor (2025).

O gráfico de efeitos principais (Figura 18) confirma que tanto o avanço como a ferramenta são os fatores que mais impactam na vibração. Em relação ao tipo de ferramenta, a cerâmica dopada com Cr₂O₃ apresentou maiores amplitudes médias de vibração em comparação à ferramenta dopada com MgO. Essa diferença pode ser explicada pela estabilidade dinâmica da ferramenta contendo MgO, que favorece um corte mais estável.

Em relação ao avanço, à medida que este cresce, o valor médio da vibração diminui. Ao dobrar o avanço, a vibração diminuiu em 34%. Da mesma forma, observa-se que velocidades de corte mais altas resultam em uma leve redução da vibração, efeito associado à diminuição da força de corte e à menor interação mecânica entre cavaco e ferramenta.

Figura 19 – Gráfico de Interação para Vibração (m/s)



Fonte: Autor (2025).

O gráfico de interação (Figura 19) mostra que, em baixos avanços, as duas ferramentas apresentam comportamento bastante diferentes. Entretanto, à medida que o avanço aumenta, a ferramenta $Al_2O_3 + Cr_2O_3$ passa a apresentar redução mais acentuada nos valores de vibração, se aproximando do comportamento da ferramenta $Al_2O_3 + MgO$, que é mais estável e apresenta menores valores de vibração nas duas faixas de avanço.

Essa diferença evidencia que a ferramenta dopada com MgO é menos sensível às variações de esforço dinâmico, o que se traduz em melhor desempenho quanto à estabilidade do processo. Tal comportamento é vantajoso especialmente no torneamento a seco de materiais endurecidos, onde oscilações excessivas podem comprometer tanto o acabamento superficial quanto a integridade da ferramenta.

4.3 EMISSÃO ACÚSTICA

A emissão acústica (EA) é um método de monitoramento amplamente utilizado para detectar e avaliar fenômenos que ocorrem durante a usinagem, como formação de cavacos, desgaste da ferramenta e vibrações. As ondas sonoras geradas no processo refletem a liberação de energia devido à deformação plástica do material

e ao atrito na interface cavaco–ferramenta. Assim, a emissão acústica está diretamente associada à intensidade das interações mecânicas no corte e pode ser utilizada como um indicador do comportamento dinâmico e da estabilidade do processo. O monitoramento da EA é especialmente útil na usinagem de aços endurecidos, onde as condições de corte são severas e as ferramentas cerâmicas estão sujeitas a elevadas tensões térmicas e mecânicas.

A Tabela 4 apresenta a análise de variância (ANOVA) para os sinais de emissão acústica. Os resultados mostram que tanto o avanço (f), como a velocidade de corte e o tipo de ferramenta tiveram influência significativa ($p < 0,05$) sobre os níveis de emissão acústica, sendo o avanço o principal responsável pelas variações observadas (representando 88,5% da variância). Esse comportamento é esperado, já que maiores avanços aumentam a espessura do cavaco, a taxa de deformação e o atrito na região de corte, elevando a intensidade das ondas acústicas emitidas.

Tabela 4 – Análise de Variância da Emissão Acústica

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	11	5,28219	0,48020	108764,87	0,000
Linear	4	5,25400	1,31350	297506,92	0,000
Ferramenta	1	0,02924	0,02924	6622,27	0,000
Vc(m/s)	2	0,54892	0,27446	62164,87	0,000
f(mm/rot)	1	4,67584	4,67584	1059075,66	0,000
Interações de 2 fatores	5	0,02817	0,00563	1276,20	0,000
Ferramenta*Vc(m/s)	2	0,00015	0,00008	17,48	0,000
Ferramenta*f(mm/rot)	1	0,00133	0,00133	301,14	0,000
Vc(m/s)*f(mm/rot)	2	0,02669	0,01334	3022,44	0,000
Interações de 3 fatores	2	0,00002	0,00001	2,47	0,126
Ferramenta*Vc(m/s)*f(mm/rot)	2	0,00002	0,00001	2,47	0,126
Erro	12	0,00005	0,00000		
Total	23	5,28225			

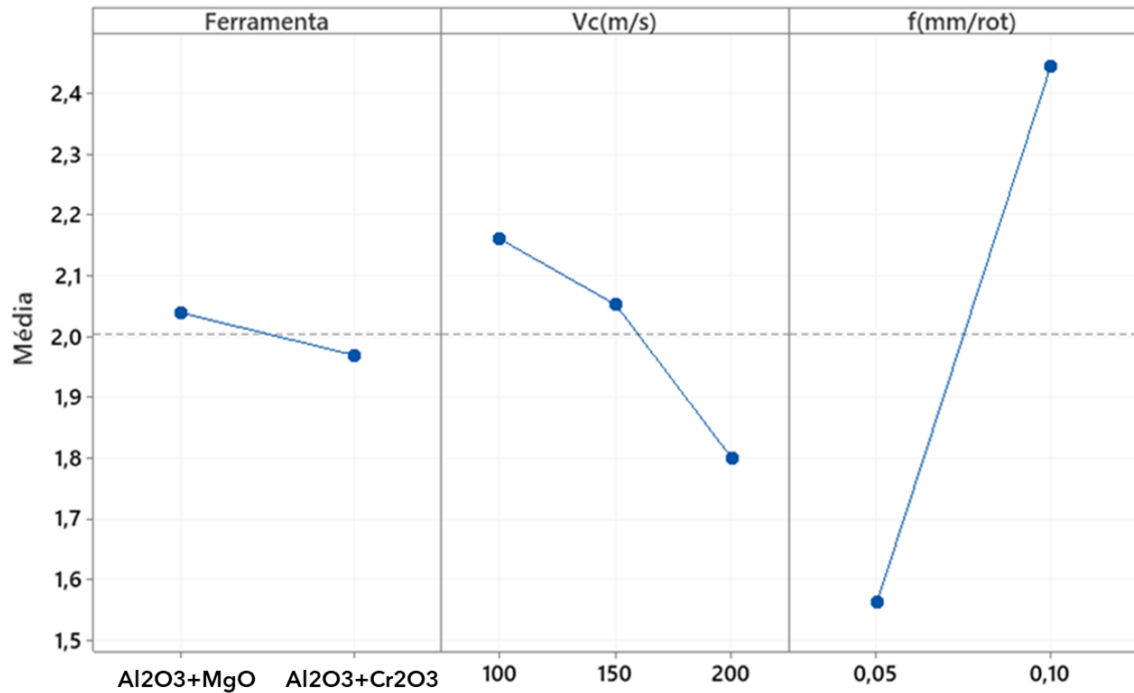
Fonte: Autor (2025).

A velocidade de corte (Vc) apresentou efeito moderado, com tendência de redução da emissão acústica em velocidades mais altas, resultado compatível com a diminuição do atrito e com a formação de cavacos mais contínuos. O tipo de ferramenta também exerceu influência estatística significativa, mas de baixa intensidade, referente às diferenças entre os mecanismos de desgaste e atrito associados às duas composições cerâmicas testadas.

As interações secundárias entre os fatores também se mostraram significativas estatisticamente, indicando que o comportamento acústico também

depende da combinação desses fatores, refletindo as características mecânicas e térmicas específicas de cada material de ferramenta e as condições de usinagem.

Figura 20 – Gráfico de Efeitos Principais para Emissão Acústica (V)

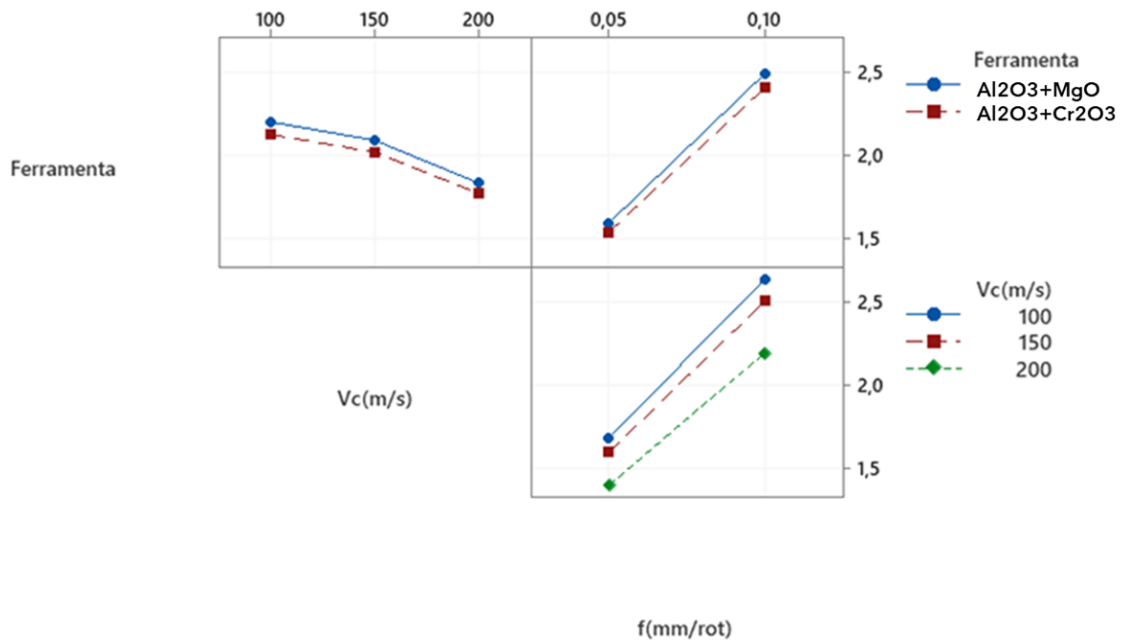


Fonte: Autor (2025).

O gráfico de efeitos principais da emissão acústica (Figura 20) evidencia o aumento do nível de sinal conforme o avanço é elevado. O crescimento da emissão sonora ocorre devido à intensificação das deformações plásticas e do atrito entre o cavaco e a face da ferramenta. Já a velocidade de corte apresenta um comportamento inverso, com redução gradual da emissão acústica em maiores velocidades, o que indica corte mais limpo e formação de cavacos mais uniformes.

Em relação ao tipo de ferramenta, observa-se que a cerâmica dopada com Cr₂O₃ apresentou valores médios menores de emissão acústica em comparação à ferramenta dopada com MgO. Isso demonstra que a ferramenta com Cr₂O₃ proporciona corte mais estável e menos ruidoso, devido à sua maior dureza e estabilidade térmica, que reduzem o atrito e a propagação de microvibrações durante o processo.

Figura 21 – Gráfico de Interação para Emissão Acústica (V)



Fonte: Autor (2025).

O gráfico de interação (Figura 21) mostra que, para baixos avanços, as duas ferramentas apresentam comportamento muito semelhante, com níveis reduzidos de emissão acústica. À medida que o avanço aumenta, o nível de emissão acústica aumenta quase paralelamente para as duas ferramentas, com a ferramenta dopada com MgO apresentando um nível de EA um pouco maior.

A menor emissão acústica indica que a energia de atrito e deformação é melhor controlada, o que também contribui para menor desgaste e maior vida útil da ferramenta. Os resultados da emissão acústica indicam que o avanço é o fator mais influente, seguido pela velocidade de corte e pelo tipo de ferramenta. Entre as ferramentas avaliadas, a cerâmica óxida dopada com Cr_2O_3 apresentou desempenho ligeiramente melhor, com níveis um pouco menores de emissão acústica.

4.4 RUGOSIDADE MÉDIA (R_a)

A rugosidade média (R_a) é um dos parâmetros mais utilizados para avaliar a qualidade superficial das peças usinadas. Ela expressa a média aritmética das irregularidades presentes no perfil da superfície, sendo diretamente influenciada pelas

condições de corte, pela geometria da ferramenta e pelo comportamento dinâmico do processo.

Em operações de torneamento de aços endurecidos, a análise do parâmetro R_a é fundamental, pois pequenas variações nos parâmetros de corte ou na integridade da ferramenta podem causar alterações significativas no acabamento superficial, comprometendo o desempenho funcional da peça.

Neste trabalho, os valores de R_a foram analisados com o objetivo de identificar os efeitos dos fatores velocidade de corte (V_c), avanço (f) e tipo de ferramenta sobre a qualidade superficial obtida, comparando o desempenho das ferramentas cerâmicas dopadas com MgO e Cr_2O_3 .

A Tabela 5 apresenta a análise de variância (ANOVA) referente ao parâmetro de rugosidade média (R_a). Os resultados indicam que apenas o fator avanço (f) foi significativo ($p < 0,05$), confirmando sua forte influência sobre a rugosidade superficial. Esse comportamento era esperado, já que o aumento do avanço amplia a espessura do cavaco e a altura dos sulcos deixados pela ferramenta na peça, resultando em valores mais elevados de R_a .

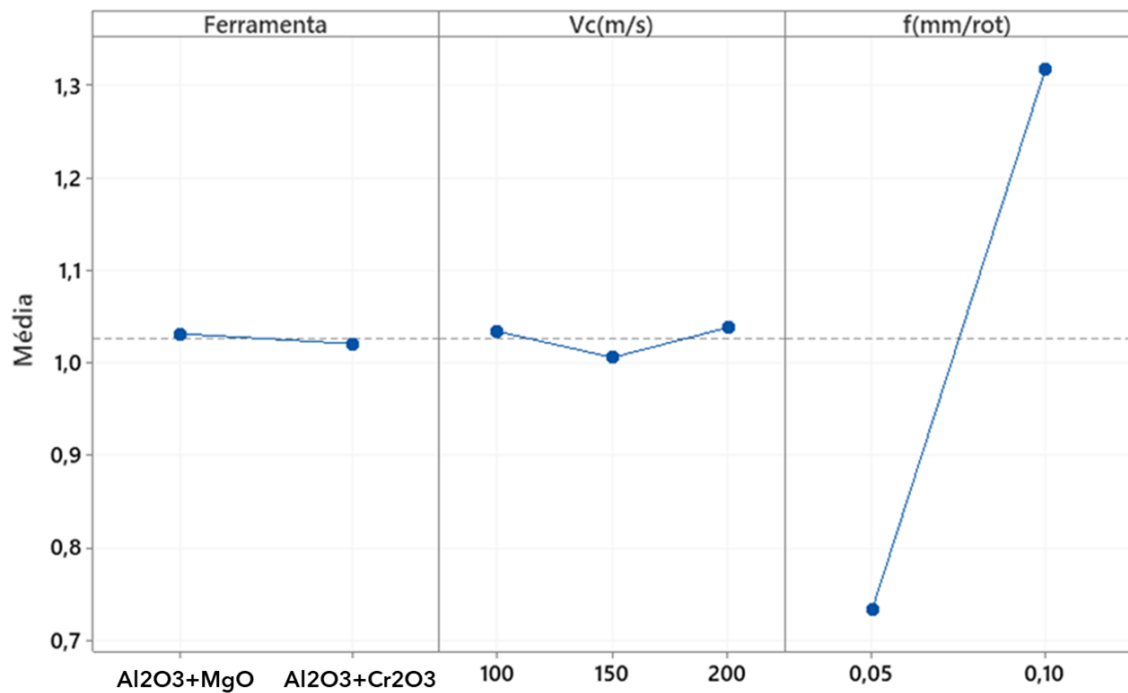
Tabela 5 – Análise de Variância da Rugosidade Média (R_a)

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	11	2,08057	0,18914	28,24	0,000
Linear	4	2,04826	0,51206	76,44	0,000
Ferramenta	1	0,00072	0,00072	0,11	0,748
$V_c(m/s)$	2	0,00499	0,00249	0,37	0,697
$f(mm/rot)$	1	2,04255	2,04255	304,92	0,000
Interações de 2 fatores	5	0,02456	0,00491	0,73	0,612
Ferramenta* $V_c(m/s)$	2	0,00559	0,00280	0,42	0,668
Ferramenta* $f(mm/rot)$	1	0,00060	0,00060	0,09	0,770
$V_c(m/s)$ * $f(mm/rot)$	2	0,01837	0,00918	1,37	0,291
Interações de 3 fatores	2	0,00775	0,00387	0,58	0,576
Ferramenta* $V_c(m/s)$ * $f(mm/rot)$	2	0,00775	0,00387	0,58	0,576
Erro	12	0,08038	0,00670		
Total	23	2,16095			

Fonte: Autor (2025).

O tipo de ferramenta e a velocidade de corte (V_c) não apresentaram influência significativa na rugosidade média. Tampouco foram significativas as interações entre avanço, tipo de ferramenta e velocidade de corte.

Figura 22 – Gráfico de Efeitos Principais para Rugosidade Média (μm)



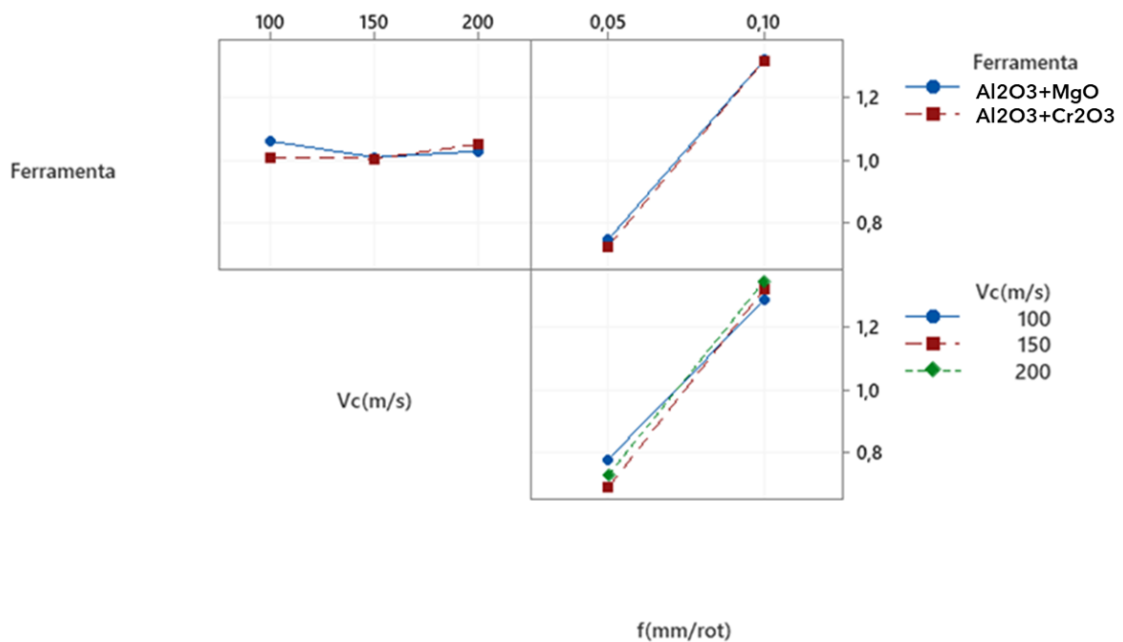
Fonte: Autor (2025).

O gráfico de efeitos principais para o parâmetro R_a (Figura 22) mostra claramente que o avanço é o único fator que produz efeitos significativos na variação da rugosidade média obtida. Com o aumento do avanço, há elevação acentuada dos valores de rugosidade média, o que confirma o comportamento típico do processo de torneamento. À medida que o avanço cresce, as marcas deixadas pela ponta da ferramenta tornam-se mais pronunciadas, degradando o acabamento superficial.

A velocidade de corte não apresentou efeitos estatisticamente significantes sobre a rugosidade. A mesma observação pode ser feita em relação ao tipo de ferramenta. Tanto a ferramenta óxida dopada com MgO como com Cr₂O₃ apresentaram níveis de rugosidade praticamente idênticos.

O gráfico de interação, mostrado na Figura 23, evidencia que não existem interferências conjuntas de fatores no que se refere à rugosidade média. Os dois tipos de ferramentas tiveram desempenho semelhante quanto à rugosidade, para todas as faixas de velocidade de corte. Apenas o avanço foi determinante na produção de peças com rugosidades diferentes.

Figura 23 – Gráfico de Interação para Rugosidade Média (μm)



Fonte: Autor (2025).

Os resultados demonstram que o avanço é o principal fator de influência sobre a rugosidade média (R_a). Segundo esse critério, é indiferente o uso de ferramentas cerâmicas óxida dopadas com Cr_2O_3 ou com MgO .

4.5 RUGOSIDADE TOTAL (R_t)

A rugosidade total (R_t) representa a diferença entre o ponto mais alto e o mais baixo do perfil da superfície usinada, refletindo os picos e vales extremos deixados pela ferramenta durante o processo de corte. Esse parâmetro é sensível a instabilidades do processo, como vibrações, desgaste da ferramenta e variações de avanço, sendo essencial para avaliar o acabamento global da peça.

No torneamento de aços endurecidos, o valor de R_t tende a aumentar quando o processo apresenta oscilação do cavaco ou microfraturas na aresta de corte, comuns em ferramentas cerâmicas sob elevadas cargas térmicas e mecânicas. Assim, a análise de R_t complementa o estudo de R_a , permitindo compreender com maior precisão o comportamento da superfície usinada sob diferentes condições de corte e tipos de ferramenta.

A Tabela 6 apresenta a análise de variância (ANOVA) para a rugosidade total (R_t). Observa-se que o avanço (f) foi novamente o fator mais significativo ($p < 0,05$), confirmando sua forte influência sobre o acabamento da superfície, sendo responsável por 71% da variância da rugosidade total. O aumento do avanço gera maior espessura de cavaco e eleva as forças de corte, resultando em picos e vales mais acentuados no perfil da superfície.

Tabela 6 – Análise de Variância da Rugosidade Total (R_t)

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	11	58,6538	5,3322	8,64	0,000
Linear	4	55,5662	13,8915	22,51	0,000
Ferramenta	1	8,3286	8,3286	13,50	0,003
Vc(m/s)	2	0,3160	0,1580	0,26	0,778
f(mm/rot)	1	46,9216	46,9216	76,03	0,000
Interações de 2 fatores	5	2,7420	0,5484	0,89	0,518
Ferramenta*Vc(m/s)	2	1,4374	0,7187	1,16	0,345
Ferramenta*f(mm/rot)	1	0,7214	0,7214	1,17	0,301
Vc(m/s)*f(mm/rot)	2	0,5832	0,2916	0,47	0,635
Interações de 3 fatores	2	0,3457	0,1728	0,28	0,761
Ferramenta*Vc(m/s)*f(mm/rot)	2	0,3457	0,1728	0,28	0,761
Erro	12	7,4054	0,6171		
Total	23	66,0593			

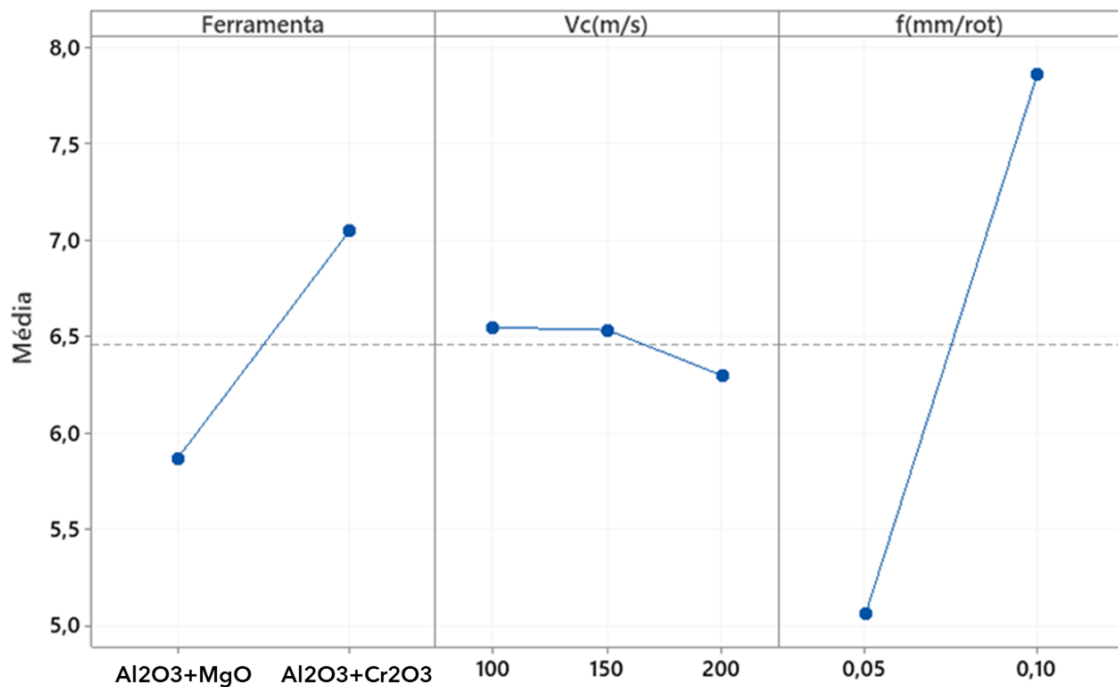
Fonte: Autor (2025).

A velocidade de corte (V_c) não apresentou influência estatisticamente relevante. Ao contrário, o tipo de ferramenta teve influência significativa ($p < 0,05$) sobre a rugosidade total, mas com menor intensidade do que a influência provocada pelo avanço. As interações entre dois fatores não foram estatisticamente relevantes.

O gráfico de efeitos principais (Figura 24) mostra que o avanço exerce influência direta e crescente sobre os valores de R_t , com aumento considerável das irregularidades à medida que o avanço se eleva (aumento de mais de 52% na rugosidade total ao se dobrar o avanço). Esse comportamento está associado ao aumento das forças de corte e ao desprendimento mais brusco dos cavacos, que acentua a formação de picos e vales na superfície.

Por outro lado, observa-se que a velocidade de corte apresentou uma tendência oposta. Em velocidades mais altas, verificou-se redução dos valores de R_t , sugerindo que o corte se torna mais estável e contínuo. No entanto, essas variações não foram estatisticamente relevantes.

Figura 24 – Gráfico de Efeitos Principais para Rugosidade Total (μm)



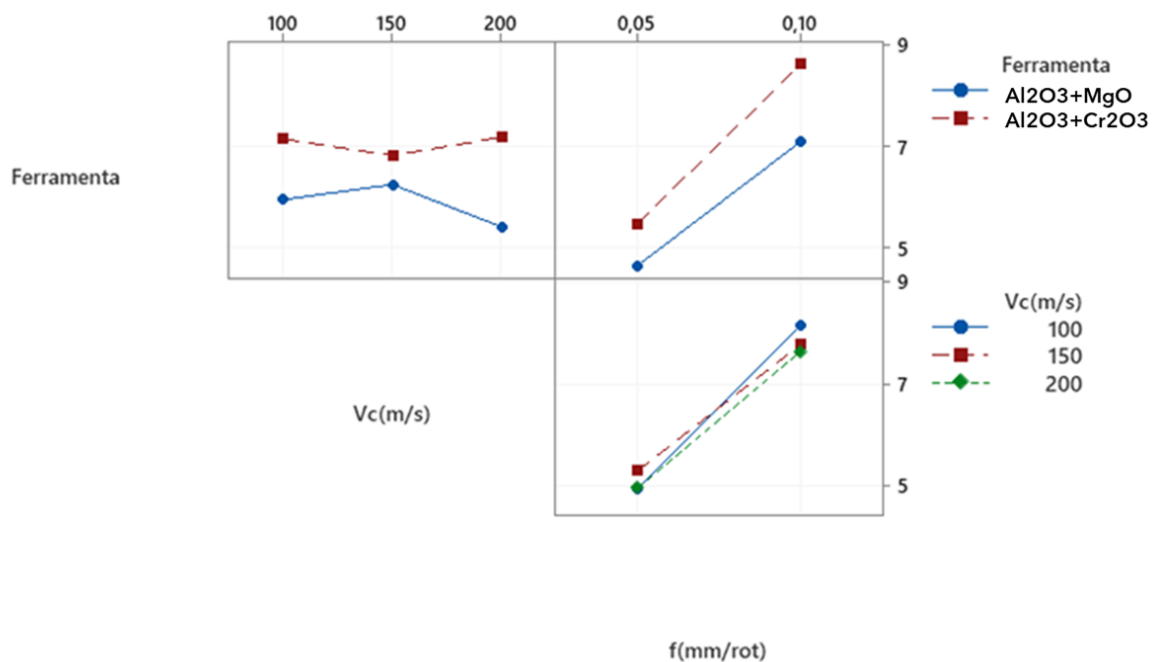
Fonte: Autor (2025).

Quanto ao tipo de ferramenta, a cerâmica dopada com MgO apresentou menores valores médios de R_t , indicando melhor desempenho na obtenção de superfícies mais homogêneas e regulares. Essa vantagem é atribuída à menor tendência à microfratura dessa composição, que mantém a integridade da aresta de corte por mais tempo.

O gráfico de interação, apresentado na Figura 25, demonstra que a ferramenta cerâmica dopada com MgO apresentou menores valores médios de R_t do que a ferramenta dopada com Cr₂O₃ em todas as condições. Apesar disso, as interações entre dois fatores não foram significativamente relevantes, sendo o tipo de ferramenta e, especialmente, o avanço os fatores que dominam a ocorrência de maiores níveis de rugosidade total e perda de qualidade superficial.

Observa-se ainda uma tendência de que a qualidade superficial obtida com a ferramenta dopada com Cr₂O₃ piore de maneira mais acentuada com aumento do avanço do que acontece com a ferramenta dopada com MgO. Apesar de não ter sido estatisticamente significativa, esse efeito poder ser observado no gráfico e reforça o melhor desempenho da ferramenta Al₂O₃ + MgO, confirmando sua melhor capacidade de suportar esforços térmicos e mecânicos sem degradação significativa da superfície de corte.

Figura 25 – Gráfico de Interação para Rugosidade Total (μm)



Fonte: Autor (2025).

A análise da rugosidade total (R_t) reforça as tendências observadas para o parâmetro R_a , confirmando o avanço como principal fator de influência. No entanto, ao contrário da rugosidade média (R_a), em que o tipo da ferramenta não trouxe diferenças relevantes na qualidade superficial, no caso da rugosidade total (R_t) cerâmica óxida dopada com MgO apresentou o melhor desempenho, com menores valores médios de R_t e maior estabilidade do processo, garantindo melhor acabamento superficial.

4.6 DESGASTE ESPECÍFICO (V_b/L_c)

O desgaste específico de flanco (V_b/L_c) é uma das formas mais adequadas de quantificar a perda de material na aresta de corte, relacionando a largura da faixa de desgaste (V_b) com o comprimento de contato (L_c) entre a ferramenta e a peça. Esse parâmetro fornece uma medida mais representativa da deterioração da ferramenta, considerando tanto a extensão do desgaste como também sua proporção em relação à área efetiva de corte.

Durante o torneamento de aços endurecidos, o desgaste de flanco é o modo mais comum de falha da ferramenta, resultante da ação abrasiva do material usinado, das altas temperaturas na zona de corte e da aderência intermitente de partículas metálicas. A taxa de desgaste é fortemente influenciada pelos parâmetros de corte e pelas propriedades físico-químicas do material da ferramenta, como dureza, estabilidade térmica e resistência à oxidação. Assim, a análise do desgaste específico permite avaliar de forma precisa o comportamento e a durabilidade das ferramentas cerâmicas dopadas com MgO e Cr₂O₃ durante o torneamento a seco do aço SAE 4340 endurecido.

A Tabela 7 apresenta a análise de variância (ANOVA) para o desgaste específico de flanco (Vb/Lc). Observa-se que os três fatores (avanço, tipo de ferramenta e velocidade de corte) se mostraram estatisticamente significantes ($p < 0,05$), com o avanço registrando a maior influência sobre o desgaste da ferramenta (mais de 50% da variância observada). O aumento do avanço eleva a espessura do cavaco e as forças de atrito, resultando em maiores temperaturas e maior desgaste da aresta de corte.

Tabela 7 – Análise de Variância do Desgaste Específico (Vb/Lc)

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	11	0,000007	0,000001	24,37	0,000
Linear	4	0,000006	0,000002	63,35	0,000
Ferramenta	1	0,000002	0,000002	77,87	0,000
Vc(m/s)	2	0,000000	0,000000	8,18	0,006
f(mm/rot)	1	0,000004	0,000004	159,17	0,000
Interações de 2 fatores	5	0,000000	0,000000	2,70	0,073
Ferramenta*Vc(m/s)	2	0,000000	0,000000	1,32	0,304
Ferramenta*f(mm/rot)	1	0,000000	0,000000	7,97	0,015
Vc(m/s)*f(mm/rot)	2	0,000000	0,000000	1,45	0,272
Interações de 3 fatores	2	0,000000	0,000000	0,58	0,575
Ferramenta*Vc(m/s)*f(mm/rot)	2	0,000000	0,000000	0,58	0,575
Erro	12	0,000000	0,000000		
Total	23	0,000007			

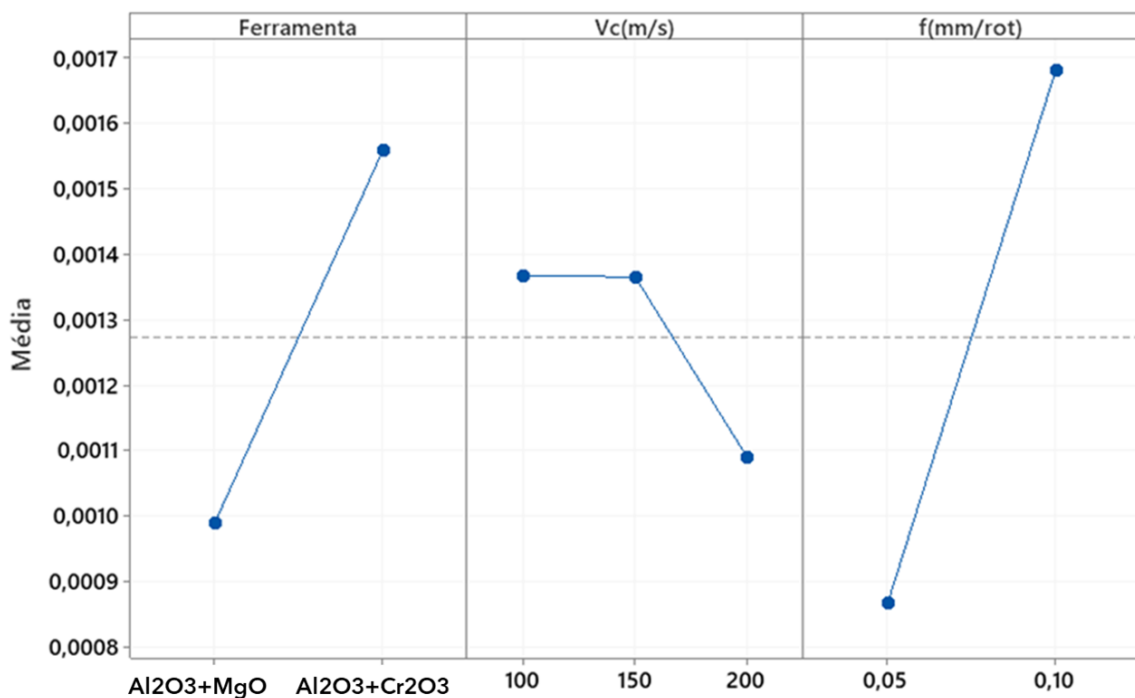
Fonte: Autor (2025).

A velocidade de corte (Vc) também apresentou influência estatisticamente relevante, porém em sentido oposto. Em velocidades mais elevadas, o desgaste tende a diminuir devido à formação de cavacos mais uniformes e à diminuição das forças de atrito. O tipo de ferramenta teve efeito expressivo (quase 30% da variância

encontrada), mostrando que as composições cerâmicas testadas apresentaram comportamentos distintos quanto à resistência ao desgaste.

A interação entre a velocidade de corte e o tipo de ferramenta também se mostrou significativa, revelando que o desempenho das ferramentas depende das condições térmicas impostas pelo processo.

Figura 26 – Gráfico de Efeitos Principais para Desgaste $V_b(\text{mm})/L_c$



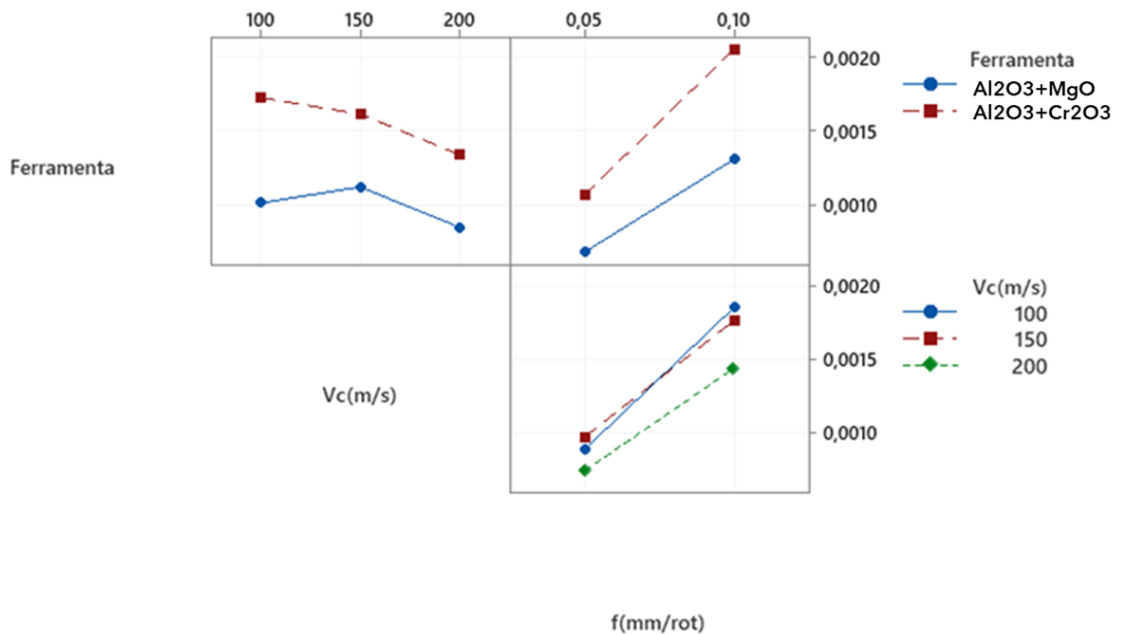
Fonte: Autor (2025).

O gráfico de efeitos principais (Figura 26) mostra que o desgaste específico (V_b/L_c) cresce de forma acentuada com o aumento do avanço, confirmando a forte relação entre a taxa de remoção de material e a deterioração da ferramenta. Esse comportamento é típico em operações de torneamento a seco, nas quais o atrito na zona de contato não é dissipado por fluido de corte, favorecendo o desgaste abrasivo e difusivo.

Em relação ao tipo de ferramenta, nota-se que a cerâmica dopada com MgO apresentou menores valores médios de desgaste específico, indicando melhor resistência ao desgaste de flanco em comparação à ferramenta dopada com Cr₂O₃. A velocidade de corte também exerce papel significativo, mas menos acentuado. À medida que a velocidade de corte aumenta, o desgaste tende a diminuir.

gradualmente, o que pode ser atribuído à diminuição das forças de atrito e efeitos negativos da formação de cavaco.

Figura 27 – Gráfico de Interação para Desgaste $V_b(\text{mm})/L_c$



Fonte: Autor (2025).

O gráfico de interação (Figura 27) confirma os efeitos do avanço e do tipo de ferramenta sobre o desgaste. Observa-se que o aumento do avanço acentua as diferenças no desgaste percebido nos dois tipos de ferramentas. Com um avanço de 0,05 mm/rotação, a ferramenta dopada com MgO apresentava um desgaste de flanco (V_b/L_c) igual a 0,000786 em valores médios, enquanto a ferramenta dopada com Cr₂O₃ apresentava um desgaste médio de 0,001157. Essa diferença percebida no desgaste entre as duas ferramentas cresce 67% quando o avanço é dobrado.

Esse resultado indica que a ferramenta dopada com MgO possui melhor estabilidade térmica, o que reduz a taxa de desgaste sob altas temperaturas. Essa característica é fundamental em processos de usinagem a seco, nos quais a ausência de fluido refrigerante intensifica as condições de atrito e calor na interface cavaco-ferramenta.

A análise do desgaste específico de flanco mostra que o avanço é o fator mais influente, seguido pelo tipo de ferramenta e pela velocidade de corte. Entre as ferramentas testadas, a cerâmica óxida dopada com MgO apresentou melhor desempenho, com menores valores de V_b/L_c e maior estabilidade quando o avanço

é aumentado, demonstrando superioridade em resistência ao desgaste e maior potencial de aplicação industrial no torneamento a seco do aço SAE 4340 endurecido.

Com o objetivo de sintetizar os resultados obtidos, o Quadro 8 apresenta um comparativo geral entre as ferramentas cerâmicas avaliadas, destacando aquela que apresentou o melhor desempenho para cada critério analisado.

Quadro 8 – Síntese dos resultados obtidos para as ferramentas de corte

Critério	Al₂O₃ + MgO	Al₂O₃ + Cr₂O₃	Melhor Desempenho
Potência	170,51 W	244,88 W	Al ₂ O ₃ + MgO apresentou o melhor desempenho, com menor consumo de potência.
Vibração	1,594 m/s	2,440 m/s	Al ₂ O ₃ + MgO apresentou o melhor desempenho, com menor ocorrência de vibração.
Emissão acústica	2,039 V	1,969 V	Al ₂ O ₃ + Cr ₂ O ₃ apresentou melhor desempenho, com menor nível de emissão acústica.
Rugosidade média	1,0315 µm	1,0205 µm	Não houve diferenças estatisticamente significativas entre as ferramentas.
Rugosidade total	5,8701 µm	7,0483 µm	Al ₂ O ₃ + MgO apresentou o melhor desempenho, com menor rugosidade total.
Desgaste específico	0,989.10 ⁻³	1,559.10 ⁻³	Al ₂ O ₃ + MgO apresentou o melhor desempenho, com menor nível de desgaste de flanco.

Fonte: Dados experimentais do presente trabalho (2025).

Observa-se que a ferramenta dopada com MgO apresentou desempenho superior na maioria dos critérios avaliados, principalmente em potência, vibração, rugosidade total e desgaste específico, enquanto a ferramenta dopada com Cr₂O₃ destacou-se apenas na emissão acústica. Esses resultados indicam que a composição com MgO é mais adequada para aplicações que exigem eficiência energética e estabilidade de corte.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de ferramentas cerâmicas óxidas dopadas com óxido de magnésio ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) e com óxido de cromo ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$) na usinagem a seco do aço SAE 4340 endurecido. A análise considerou variáveis de saída como potência consumida, vibração, emissão acústica, rugosidade média (R_a), rugosidade total (R_t) e desgaste específico de flanco (V_b/L_c), com o objetivo de determinar a influência dos parâmetros de corte e comparar o desempenho das ferramentas no torneamento de materiais de alta dureza.

Com base nos resultados experimentais e na análise estatística (ANOVA, gráficos de efeitos principais e de interação), observou-se que o avanço foi o parâmetro de corte de maior influência em praticamente todas as variáveis estudadas, seguido do tipo de ferramenta e da velocidade de corte. O aumento do avanço resultou, de modo geral, em maior potência consumida e em alterações no comportamento dinâmico do sistema, enquanto a elevação da velocidade de corte produziu efeitos variados, dependendo da resposta analisada.

Na comparação entre as ferramentas, verificou-se que a cerâmica dopada com óxido de magnésio ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$) apresentou melhor desempenho em quatro dos seis critérios avaliados, destacando-se por menor potência consumida, menor vibração, menor rugosidade total (R_t) e menor desgaste específico de flanco (V_b/L_c). Esses resultados indicam maior eficiência energética, estabilidade de corte e resistência ao desgaste dessa composição, tornando-a uma alternativa tecnicamente promissora para o torneamento a seco de aços endurecidos.

A ferramenta dopada com óxido de cromo ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$) apresentou melhor desempenho apenas na emissão acústica. Já no parâmetro de rugosidade média (R_a), as diferenças entre as duas ferramentas não foram estatisticamente significativas, indicando que ambas foram capazes de produzir superfícies com qualidade superficial semelhante, quando observadas pelo critério específico da rugosidade média.

De forma geral, os resultados demonstram que as ferramentas cerâmicas óxidas, especialmente as dopadas com MgO, constituem uma alternativa viável e em relação a ferramentas convencionais de CBN ou diamante, tradicionalmente utilizadas em operações de *hard turning*. Além disso, o fato de o processo ter sido conduzido a

seco reforça o potencial ambiental e econômico da aplicação, eliminando a necessidade de fluidos de corte e reduzindo os custos operacionais associados.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar a análise sobre os mecanismos de desgaste das ferramentas cerâmicas dopadas, além de investigar outras combinações de dopantes que possam otimizar o equilíbrio entre dureza, tenacidade e estabilidade térmica. Também seria relevante ampliar os estudos para diferentes materiais de peça, a fim de verificar o comportamento dessas ferramentas em condições de usinagem mais amplas e próximas da realidade industrial.

Este estudo contribuiu para confirmar a eficácia e a competitividade das ferramentas cerâmicas dopadas com MgO para o torneamento a seco do aço SAE 4340 endurecido, validando sua aplicação prática em processos industriais que demandam alto desempenho, menor impacto ambiental e custos reduzidos, sem comprometer a qualidade superficial nem a durabilidade da ferramenta.

REFERÊNCIAS

- AÇOS NOBRE. **Dureza dos aços:** qual o impacto na escolha do aço ideal? Disponível em: <https://acosnobre.com.br/blog/dureza-dos-acos-como-escolher/>. Acesso em: 27 ago. 2025.
- AHMAD, A. A.; GHANI, J. A.; HARON, C. H. C. Green lubrication technique for sustainable machining of AISI 4340 alloy steel. **Jurnal Tribologi**, Johor Bahru, v. 28, p. 1-19, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Ahsana-Ahmad/publication/375997582_Green_lubrication_technique_for_sustainable_machining_of_AISI_4340_alloy_steel/links/6566b24fb86a1d521b19866d/Green-lubrication-technique-for-sustainable-machining-of-AISI-4340-alloy-steel.pdf. Acesso em: 30 nov. 2025.
- ARSECULARATNE, J. A.; ZHANG, L. C.; MONTROSS, C. Wear and tool life of tungsten carbide, PCBN and PCD cutting tools. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Kidlington, v. 46, n. 5, p. 482-491, 2006. Disponível em: https://www.precision-manufacturing.unsw.edu.au/sites/pm/files/uploads/Publications/Diamond_and_Its_Composite/wear_and_tool_life_of_tungsten_carbide_pcbn_and_pcd_cutting_tools_0.pdf. Acesso em: 30 nov. 2025.
- ARULKIRUBAKARAN, D.; SENTHILKUMAR, V.; DINESH, S. Effect of textures on machining of Ti-6Al-4V alloy for coated and uncoated tools: a numerical comparison. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 93, n. 1, p. 347-360, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-016-9381-y>. Acesso em: 30 nov. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12545:** conceitos da técnica de usinagem: forças, energia, trabalho e potências - terminologia. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4287:** especificações geométricas do produto (GPS) - rugosidade: método do perfil - termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002.
- AUTODESK INC. **Fundamentals of CNC machining.** A practical guide for beginners. New York: Autodesk, 2014.
- BARTARYA, G.; CHOUDHURY, S. K. State of the art in hard turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Kidlington, v. 53, n. 1, p. 1-14, 2012. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/68904354/j.ijmachtools.2011.08.01920210827-9243-u32yao.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2025.
- BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W. A. **Fundamentals of machining and machine tools.** 2nd. ed. New York: Marcel Dekker, 1989.
- BRONISZEWSKI, K.; WOZNIAK, J.; CZECHOWSKI, K.; JAWORSKA, L.; OLSZYNA, A. Al₂O₃-Mo cutting tools for machining hardened stainless steel. **Wear**, Lausanne, v. 303, n. 1-2, p. 87-91, 2013.

CAMPOS, P.; DAVIM, J. P.; FERREIRA, J. R.; PAIVA, A. P.; BALESTRASSI, P. P. The machinability of hard materials: a review. In: DAVIM, J. P. (ed.). **Machinability of advanced materials**. Hoboken: Wiley-ISTE, 2014. p. 145-173.

CAPPELLINI, C.; ABENI, A. Development and implementation of crater and flank tool wear model for hard turning simulations. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 120, n. 3, p. 2055-2073, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00170-022-08885-y.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2025.

CARPINETTI, L. C. R.; GONÇALVES FILHO, E. V.; PORTO, A. J. V.; JASINEVICIUS, R. G. **Rugosidade superficial**: conceitos e princípios de medição. São Carlos: Apostila, pp. 51, Seção de publicações da EESC-USP, 1996. Disponível em: <http://repositorio.eesc.usp.br/bitstream/RIEESC/7522/1/Rugosidade%20superficial.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2025.

CHAKRABORTY, P.; ASFOUR, S.; CHO, S.; ONAR, A.; LYNN, M. Modeling tool wear progression by using mixed effects modeling technique when end-milling AISI 4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 205, n. 1-3, p. 190–202, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/248253247_Modeling_tool_wear_progression_by_using_mixed_effects_modeling_technique_when_end-milling_AISI_4340_steel. Acesso em: 30 nov. 2025.

COSTA, A.L.V. da; MEI, P.H. **Aços e ligas especiais**. São Paulo: Editora Blucher, 2010.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. São Paulo: Art Liber, 2014.

EL WARDANY, T. I.; ELBESTAWI, M. A. Prediction of tool failure rate in turning hardened steels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 13, n. 1, p. 1-16, 1997. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01179225>. Acesso em: 30 nov. 2025.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2018.

GOVEKAR, E.; GRADIŠEK, J.; GRABEC, I. Analysis of acoustic emission signals and monitoring of machining processes. **Ultrasonics**, Amsterdam, v. 38, n. 1-8, p. 598-603, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0041624X99001262>. Acesso em: 30 nov. 2025.

GRIGORIEV, S. N.; FEDOROV, S. V.; HAMDY, K. Materials, properties, manufacturing methods and cutting performance of innovative ceramic cutting tools—a review. **Manufacturing review**, Les Ulis, v. 6, p. 19, 2019. Disponível em: <https://mfr.edp-open.org/articles/mfreview/pdf/2019/01/mfreview190014.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2025.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of modern manufacturing**: materials, processes, and systems. 6th ed. Hoboken: Wiley, 2016.

GUO, Y. B.; AMMULA, S. C. Real-time acoustic emission monitoring for surface damage in hard machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Kidlington, v. 45, n. 14, p. 1622–1627, 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695505000581>. Acesso em: 30 nov. 2025.

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

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S.R. **Manufacturing engineering and technology**. 7th. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2014.

KURLOV, A. S.; GUSEV, A. I. **Tungsten carbides**. Berlin: Springer, 2013. (Springer Series in Materials Science, v. 184). p. 34-36.

LI, X. A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Kidlington, v. 42, n. 2, p. 157-165, 2002. Disponível em: https://lixiaoli.tripod.com/papers/IJMTM_02.pdf. Acesso em: 30 nov. 2025.

LIMA, F. E.; CORRÊA, M. Usinagem de materiais endurecidos. **Revista tecnologia**, Fortaleza, v. 23, n. 1, p. 38-44, 2002. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/download/168/4372>. Acesso em: 30 nov. 2025.

LIMA, J. G. de; AVILA, R. F. de; ABRAO, A. M. Turning of hardened AISI 4340 steel using coated carbide inserts. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B**: journal of engineering manufacture, London, v. 221, n. 8, p. 1359-1366, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/245386692_Turning_of_hardened_AISI_4340_steel_using_coated_carbide_inserts. Acesso em: 30 nov. 2025.

LIU, J.; JIANG, C.; YANG, X.; SUN, S. Review of the application of acoustic emission technology in green manufacturing. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, Seoul, v. 11, n. 3, p. 995-1016, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40684-023-00557-w>. Acesso em: 30 nov. 2025.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. da. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Editora Blucher, 2015.

MAIA, L. H. A.; ABRAO, A. M.; VASCONCELOS, W. L.; SALES, W. F.; MACHADO, A. R. A new approach for detection of wear mechanisms and determination of tool life in turning using acoustic emission. **Tribology International**, Guildford, Surrey, v. 92, p. 519–532, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X15003151>. Acesso em: 30 nov. 2025.

MIKULA, J.; DOBRZANSKI, L. A. PVD and CVD coating systems on oxide tool ceramics. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, Gliwice, v. 24, n. 2, p. 75-78, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Jaroslav-Mikula/publication/40804806_PVD_and_CVD_coating_systems_on_oxide_tool_ceramics/links/54057e440cf2c48563b14ca1/PVD-and-CVD-coating-systems-on-oxide-tool-ceramics.pdf. Acesso em: 30 nov. 2025.

MORADI, H.; VOSSOUGH, G.; BEHZAD, M.; MOVAHHEDY, M.R. Vibration absorber design to suppress regenerative chatter in nonlinear milling process: Application for machining of cantilever plates. **Applied Mathematical Modelling**, New York, v. 39, n. 2, p. 600–620, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X14003291>. Acesso em: 30 nov. 2025.

NARASIMHA, M.; KUMAR, R. R.; KASSIE, A. Performance of coated carbide tools. **The International Journal of Engineering and Science**, [s.l.], v. 2, n. 6, p. 47-54, 2013. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/31505555/G0264038045.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2025.

PAWANR, S.; GUPTA, K. Dry machining techniques for sustainability in metal cutting: a review. **Processes**, Basel, v. 12, n. 2, p. 417, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/12/2/417>. Acesso em: 30 nov. 2025.

PIMENOV, D. Y.; MIA, M.; GUPTA, M. K.; MACHADO, A. R.; PINTAUDE, G.; UNUNE, D. R.; KUNTOGLU, M. Resource saving by optimization and machining environments for sustainable manufacturing: a review and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 166, p. 112660, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032122005524>. Acesso em: 30 nov. 2025.

ROY, S.; KUMAR, R.; DAS, R. K.; SAHOO, A. K. A comprehensive review on machinability aspects in hard turning of AISI 4340 steel. In: **IOP Conference Series: materials science and engineering**. Bristol: IOP Publishing, 2018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/390/1/012009/pdf>. Acesso em: 30 nov. 2025.

SAHIN, Y. Comparison of tool life between ceramic and cubic boron nitride (CBN) cutting tools when machining hardened steels. **Journal of materials processing technology**, Amsterdam, v. 209, n. 7, p. 3478-3489, 2009. Disponível em: https://www.academia.edu/download/99917401/exemplo-Comparison_20of_20tool_20life_20between_20ceramic_20and_20cubic_20boron_20nitride_20CBN_20cutting_20tools_20when_20machining_20h.pdf. Acesso em: 30 nov. 2025.

SAHOO, A. K.; SAHOO, B. Experimental investigations on machinability aspects in finish hard turning of AISI 4340 steel using uncoated and multilayer coated carbide inserts. **Measurement**, London, v. 45, n. 8, p. 2153-2165, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224112002242>. Acesso em: 30 nov. 2025.

SAHU, S.; CHOUDHURY, B. B. Optimization of surface roughness using taguchi methodology & prediction of tool wear in hard turning tools. **Materials Today: proceedings**, Amsterdam, v. 2, n. 4-5, p. 2615-2623, 2015. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/95067510/j.matpr.2015.07.21820221130-1-wxk71h.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2025.

SCHEFFER, C.; KRATZ, H.; HEYNS, P. S.; KLOCKE, F. Development of a tool wear-monitoring system for hard turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Kidlington, v. 43, n. 10, p. 973-985, 2003. Disponível em: https://www.academia.edu/download/37753976/2003_IJMTM_Scheffer_Kratz_Heyns_Klocke_Development_of_a_tool_wear_monitoring_system_for_hard_turning.pdf. Acesso em: 30 nov. 2025.

SELEZNEV, A.; PINARGOTE, N. W. S.; SMIRNOV, A. Ceramic cutting materials and tools suitable for machining high-temperature nickel-based alloys: a review. **Metals**, Basel, v. 11, n. 9, p. 1385, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/9/1385>. Acesso em: 30 nov. 2025.

SHARMA, A.; BABBAR, A.; TIAN, Y.; PATHRI, B. P.; GUPTA, M.; SINGH, R. Machining of ceramic materials: a state-of-the-art review. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, Paris, v. 17, n. 6, p. 2891-2911, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12008-022-01016-7>. Acesso em: 30 nov. 2025.

SHARMA, V.; PANDEY, P. M. Optimization of machining and vibration parameters for residual stresses minimization in ultrasonic assisted turning of 4340 hardened steel. **Ultrasonics**, Amsterdam, v. 70, p. 172–182, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0041624X16300518>. Acesso em: 30 nov. 2025.

SHIHAB, S. K.; KHAN, Z. A.; MOHAMMAD, A.; SIDDIQUEE, A. N. A review of turning of hard steels used in bearing and automotive applications. **Production & Manufacturing Research**, London, v. 2, n. 1, p. 24-49, 2014. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/21693277.2014.881728>. Acesso em: 30 nov. 2025.

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

SOUSA, V. F. C.; SILVA, F. J. G. Recent advances in turning processes using coated tools: a comprehensive review. **Metals**, Basel, v. 10, n. 2, p. 170, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/2/170>. Acesso em: 30 nov. 2025.

SOUZA, A. J. de. **Apostila de processos de fabricação por usinagem**. Parte 1. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. **Metal cutting: theory and practice**. 3rd. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

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://home.iitm.ac.in/samuelgl/pdf26.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2025.

THELNING, K. **Steel and its heat treatment**. 2nd ed. Butterworth-heinemann: Oxford, 2013.

VIKRAM, K. A.; RATNAM, C.; NARAYANA, K. S. Vibration diagnosis and prognostics of turn-milling operations using HSS and carbide end mill cutters. **Procedia Technology**, Amsterdam, v. 23, p. 217–224, 2016. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017316300214/pdf?md5=1a62f0f70d04ed387b5d7031a5c015b5&pid=1-s2.0-S2212017316300214-main.pdf&_valck=1. Acesso em: 30 nov. 2025.

WEREMCZUK, A.; RUSINEK, R.; WARMINSKI, J. The concept of active elimination of vibrations in milling process. **Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 31, p. 82–87, 2015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115002346/pdf?md5=6f2df002c6f9f9f44af47d3544a4c571&pid=1-s2.0-S2212827115002346-main.pdf&_valck=1. Acesso em: 30 nov. 2025.

ZHAO, J.; YUAN, X.; ZHOU, Y. Cutting performance and failure mechanisms of an Al₂O₃/WC/TiC micro-nano-composite ceramic tool. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, Amsterdam, v. 28, n. 3, p. 330-337, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263436809001590>. Acesso em: 30 nov. 2025.

GLOSSÁRIO

Acabamento superficial: condição final da superfície usinada, caracterizada por parâmetros como rugosidade média (R_a) e rugosidade total (R_t).

Análise de variância (ANOVA): método estatístico utilizado para identificar a influência de diferentes fatores sobre uma variável de resposta, verificando se há diferenças significativas entre médias.

Aresta de corte: região da ferramenta que entra em contato direto com o material, promovendo o cisalhamento do cavaco.

Aço SAE 4340: aço ligado ao níquel, cromo e molibdênio, conhecido por sua alta resistência mecânica, tenacidade e boa temperabilidade.

Avanço (f): distância linear percorrida pela ferramenta a cada rotação da peça no processo de torneamento, geralmente expressa em milímetros por rotação (mm/rev).

Cerâmica dopada: material cerâmico cuja composição base (geralmente Al_2O_3) é modificada com aditivos como MgO ou Cr_2O_3 , a fim de melhorar propriedades mecânicas ou térmicas.

Cavaco: fragmento de material removido da peça durante o processo de usinagem.

Desgaste de flanco (V_b): tipo de desgaste localizado na face lateral da ferramenta, causado pelo atrito entre a ferramenta e a superfície da peça usinada.

Desgaste específico (V_b/L_c): relação entre o desgaste de flanco (V_b) e o comprimento de contato (L_c), usada para comparar a taxa de desgaste entre diferentes condições de corte.

Emissão acústica (EA): sinal sonoro de alta frequência gerado pela liberação de energia durante a deformação ou fratura do material durante o processo de corte.

Ferramenta cerâmica: ferramenta de corte fabricada a partir de materiais cerâmicos, como óxidos, carbeto ou nitreto, que apresentam alta dureza e resistência ao desgaste.

Ferramenta cerâmica óxida: tipo de ferramenta cerâmica cuja composição baseia-se em óxidos, como o óxido de alumínio (Al_2O_3), podendo ser dopada com outros óxidos para otimizar propriedades.

Hard turning: termo em inglês que designa o torneamento de materiais endurecidos, geralmente acima de 45 HRC, como alternativa à retificação.

Parâmetros de corte: variáveis que controlam o processo de usinagem, como velocidade de corte (V_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p).

Potência de corte: quantidade de energia requerida pela máquina-ferramenta para realizar o processo de remoção de material.

Rugosidade: irregularidades microscópicas da superfície usinada, medidas por parâmetros como R_a (rugosidade média) e R_t (rugosidade total).

Torneamento: processo de usinagem em que a peça gira em torno do próprio eixo, enquanto uma ferramenta de corte avança linearmente, removendo material sob a **forma de cavacos**.

Usinagem: processo de fabricação que remove material de uma peça bruta, conferindo-lhe forma, dimensões e acabamento superficial definidos.

Velocidade de corte (V_c): velocidade linear relativa entre a aresta da ferramenta e a superfície da peça, expressa em metros por minuto (m/min).

Vibração: oscilação mecânica gerada durante o corte, que pode afetar a estabilidade do processo e a qualidade superficial da peça.