



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

GLAYDSON ANDRÉ SIQUEIRA RODRIGUES

**Torneamento do aço ABNT 52100 endurecido utilizando ferramentas experimentais
cerâmicas $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Cr}_2\text{O}_3$ e $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$**

Guaratinguetá - SP

2023

Glaydson André Siqueira Rodrigues

**Torneamento do aço ABNT 52100 endurecido utilizando ferramentas experimentais
cerâmicas $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Cr}_2\text{O}_3$ e $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na Área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves

Guaratinguetá - SP

2023

R696t	<p>Rodrigues, Glaydson André Siqueira Torneamento do aço ABNT 52100 endurecido utilizando ferramentas experimentais cerâmicas Al₂O₃+Cr₂O₃ e Al₂O₃+MgO / Glaydson André Siqueira Rodrigues - Guaratinguetá, 2023. 93 f : il. Bibliografia: f. 87-92</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves</p> <p>1. Aço de alta resistência. 2. Usinagem. 3. Ferramentas de corte. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.9</p>
-------	--

Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O presente trabalho é uma iniciativa para o desenvolvimento e aplicação de ferramentas cerâmicas nacionais, desenvolvidas em laboratórios da universidade, para a usinagem de aços endurecidos cujo mercado é dominado por empresas estrangeiras, além de buscar propor alternativas em relação às ferramentas de nitreto cúbico de boro (CBN) que são normalmente aplicadas nestes materiais. As ferramentas desenvolvidas e testadas apresentam dopagens e composição que permitiram serem usadas com ferramentas de corte em altas velocidades e usinando o aço ABNT 52100 (SAE 52100) temperado, com dureza superior à 60 HRc, no processo de torneamento. A usinagem de materiais endurecidos (*Hard machining*) já é uma realidade na indústria nacional sendo usada na fabricação de rolamentos, eixos, tubos e engrenagens, sendo aplicada na usinagem de acabamento visando a eliminação da etapa de retificação. Rugosidades médias (R_a) de $0,2 \mu\text{m}$ podem ser obtidas no hard machining, porém o grande problema deste tipo de operação é o rápido desgaste da ferramenta e o pequeno tempo de vida. Assim, a utilização de cerâmicas é uma opção para a usinagem endurecida, no entanto sua alta dureza e baixa tenacidade exigem desenvolvimentos em termos de composição e geometria para que possam ser empregadas. Essas composições e geometrias utilizadas apresentam grande potencial para o setor industrial e econômico do país podendo vir a ser produzidas nacionalmente, gerando receitas, empregos, novas indústrias e barateando toda a cadeia produtiva de componentes que utilizam aços endurecidos.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH


The present work is an initiative for the development and application of national ceramic tools, developed in university laboratories, for the machining of hardened steels whose market is dominated by foreign companies, in addition to seeking to propose alternatives in relation to the cubic boron nitride (CBN) tools that are normally applied in these materials. The tools developed and tested have doping and composition that allowed them to be used with cutting tools at high speeds and machining tempered ABNT 52100 steel (SAE 52100 steel), with a hardness greater than 60 HRc, in the hard turning process. Machining of hardened materials (*Hard machining*) is already a reality in national industry, being used in the manufacture of bearings, shafts, tubes and gears, being applied in finishing machining in order to eliminate the grinding process. Average roughness (R_a) of 0.2 μm can be obtained in hard machining, however the major problem of this type of operation is the rapid wear of the tool and the short lifetime. Thus, the use of ceramics is an option for hardened machining, however their high hardness and low tenacity require developments in terms of composition and geometry so that they can be used. These compositions and geometries used have great potential for the industrial and economic sector of the country and may be produced nationally, generating revenue, jobs, new industries and lowering the entire production chain of components that use hardened steel.

GLAYDSON ANDRÉ SIQUEIRA RODRIGUES


**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: MESTRADO**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES
Orientador - UNESP
participou por videoconferência


Prof. Dr. JOSE VITOR CANDIDO DE SOUZA
UNESP
participou por videoconferência

 Documento assinado digitalmente
CLEVERSON PINHEIRO
Data: 06/03/2023 20:34:52-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr. CLEVERSON PINHEIRO
IFSP
participou por videoconferência

MARÇO de 2023

DADOS CURRICULARES

Glaydson André Siqueira Rodrigues

NASCIMENTO	18.09.1981 – Lorena / SP
FILIAÇÃO	Messias André Rodrigues Marlene Aparecida Siqueira Rodrigues
2020/2021	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado- Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
2013/2016	Curso de Graduação Tecnologia em Projetos Mecânicos – Fatec Pindamonhangaba - SP

Dedico este trabalho de maneira especial à minha família, a minha esposa Solange Santos de Paula Rodrigues e ao meu filho Glaydson Henrique de Paula Rodrigues que em todos os momentos estiveram comigo me incentivando e me dando forças para continuar buscando o meu melhor nos estudos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça pelo dom da minha vida e por sempre estar comigo em todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves, que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

Ao Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza FEG/UNESP por toda sua ajuda, orientação e auxílio recebido na execução deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Marcel Yuzo Kondo pela parceria e todo o apoio com os programas em LabView e Matlab e apoio nos ensaios de usinagem e outros procedimentos de laboratório.

Ao técnico José Manoel Bernardes – FEG/UNESP – Departamento de Materiais e Tecnologia, pelo apoio nos procedimentos de ensaio em usinagem e programação do centro de torneamento.

Aos meus pais Messias André Rodrigues e Marlene Aparecida Siqueira Rodrigues, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia e Ciência do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo suporte.

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

Goethe

RESUMO

Nos processos de fabricação por usinagem de aços endurecidos, o principal objetivo é eliminar a etapa de retificação produzindo maior produtividade e importante redução de custos. A qualidade da usinagem desses materiais proporciona aumento da vida à fadiga da peça, porém, as ferramentas de corte sofrem degradação com conseqüente redução de vida. Entre os aços endurecidos, o aço ABNT 52100 é utilizado principalmente na produção de rolamentos devido ao elevado teor de carbono, além de outros elementos de ligas como o cromo. Os elementos de ligas utilizado promove elevada dureza, que após a têmpera pode chegar a 66 HRC. Este estudo tem como objetivo analisar a usinabilidade do aço ABNT 52100 endurecido pelo processo de torneamento sem a utilização de fluido de corte com duas ferramentas cerâmica, uma base de $Al_2O_3+Cr_2O_3$ e a segunda à base de Al_2O_3+MgO . Com o objetivo de analisar a usinabilidade do aço ABNT 52100 endurecido no processo de torneamento e a viabilidade das ferramentas de corte, foi verificado o comportamento das variáveis de saída do processo como rugosidade, desgaste, avarias das ferramentas, potência de usinagem, vibração, emissão acústica, tipo e formas de cavaco. Utilizando um arranjo fatorial completo onde foram utilizadas duas velocidades de corte V_c (120 e 160 m/min.), três profundidades de usinagem a_p (0,75;1,0 e 1,25 mm) para as duas ferramentas cerâmicas usinando sem fluido de corte. Observou-se que com diferentes dopagens é possível obter diferentes resultados no comportamento das ferramentas em usinagem e que a profundidade de usinagem (a_p) é o fator que mais influenciou nos resultados de rugosidade. Os resultados obtidos demonstram que é possível, em superfícies torneadas do Aço ABNT 52100 endurecido, atingir rugosidades compatíveis com o processo de retificação utilizando ferramentas cerâmicas experimentais sem refrigeração, sendo que a ferramenta dopada com óxido de magnésio proporcionou resultados mais promissores.

PALAVRAS-CHAVE: Aços endurecidos; Aplicações industriais; Acabamento superficial; Desgaste de flanco.

ABSTRACT

In the manufacturing processes by machining of hardened steels, the main objective is to eliminate the grinding step producing higher productivity and important cost reduction. The quality of the machining of these materials provides increased fatigue life of the workpiece, but the cutting tools suffer degradation with consequent reduction in life. Among hardened steels, ABNT 52100 steel is used mainly in the production of bearings due to its high carbon content, in addition to other alloying elements such as chromium. The alloying elements used promotes high hardness, which after hardening can reach 66 HRC. This study aims to analyze the machinability of ABNT 52100 steel hardened by turning process without the use of cutting fluid with two ceramic tools, one based on $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Cr}_2\text{O}_3$ and the second based on $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$. In order to analyze the machinability of hardened ABNT 52100 steel in the turning process and the feasibility of the cutting tools, the behavior of the process output variables such as roughness, wear, tool failures, machining power, vibration, acoustic emission, chip type and forms were verified. Using a full factorial arrangement where two cutting speeds V_c (120 and 160 m/min.), three machining depths a_p (0.75;1.0 and 1.25 mm) were used for the two ceramic tools machining without cutting fluid. It was observed that with different doping it is possible to obtain different results in the behavior of the tools in machining and that the machining depth (a_p) is the factor that most influenced the roughness results. The results obtained show that it is possible, on turned surfaces of hardened ABNT 52100 steel to achieve roughness compatible with the grinding process using experimental ceramic tools without cooling, and the tool doped with magnesium oxide provided more promising results.

KEYWORDS: Hardened steels; Industrial applications; Surface finishing; Flank wear.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Classificação ABNT 52100 (aços baixa-liga).....	21
Figura 2- Microestrutura aço ABNT 52100 após esferoidização.....	24
Figura 3-Zonas de deformação no processo de corte.....	26
Figura 4- Movimentos e direções no torneamento.....	27
Figura 5- Representação dos movimentos de avanço x rugosidade.....	28
Figura 6- Divisão de materiais cerâmicos para ferramentas de corte.....	35
Figura 7- Resumo da relação entrada/saída no processo de torneamento.....	39
Figura 8- Representação gráfica de rugosidade: a) R_a e b) R_t e R_z	41
Figura 9- Forças atuando na ferramenta de corte.....	42
Figura 10- Desgastes nas ferramentas de corte.....	45
Figura 11- Avarias nas ferramentas de corte.....	46
Figura 12- Fluxograma de atividades desenvolvidas.....	48
Figura 13- Desenho do corpo de prova (unidades em mm).....	49
Figura 14- Torno CNC modelo GL 240M.....	50
Figura 15 - Tela do programa para captação de sinais durante os ensaios.....	51
Figura 16 - Ligação do sensor de potência acoplado na entrada do motor de rotação do centro de torneamento CNC.....	51
Figura 17 – Sensores para coleta dos dados de vibração e emissão acústica fixados no porta ferramentas.....	52
Figura 18– Rugosímetro portátil da MAHR modelo MarSurf M300 + RD18.....	52
Figura 19– Pastilhas experimentais RNGN120400 de (a) Al_2O_3 -MgO e (b) Al_2O_3 - Cr_2O_3	54
Figura 20-Micrografia das ferramentas cerâmicas (a) Al_2O_3 - Cr_2O_3 e (b) Al_2O_3 -MgO.....	54
Figura 21– Região identificada no gráfico com a potência no vazio e o contato efetivo de corte.....	56
Figura 22– Exemplo do gráfico gerado com as máximas de Emissão acústica, vibração e potência.....	57
Figura 23– Microscópio marca Mitutoyo modelo QS-LBZ -Visual QUICK SCOPE série 359.....	58
Figura 24– Gráfico dos efeitos principais para emissão acústica máxima.....	60
Figura 25– Gráfico das interações para emissão acústica máxima.....	61
Figura 26 – Gráfico dos efeitos principais para média da vibração.....	62
Figura 27– Gráfico das interações para média da vibração.....	63

Figura 28 – Gráfico dos efeitos principais para média da potência.....	65
Figura 29 – Gráfico dos efeitos principais para potência máxima	67
Figura 30 – Gráfico dos efeitos principais para Rugosidade (R_a)	69
Figura 31– Gráfico das interações para Rugosidade (R_a).....	70
Figura 32– Gráfico dos efeitos principais para Rugosidade (R_t).....	72
Figura 33– Gráfico das interações para Rugosidade (R_t)	73
Figura 34– Gráfico dos efeitos principais para Rugosidade (R_z)	75
Figura 35– Gráfico das interações para Rugosidade (R_z).....	76
Figura 36– (a) Desgaste de flanco V_b (mm) e (b) lascamento Ensaio 2.....	77
Figura 37–lascamento aresta 3, ferramenta 6, Ensaio 11.	78
Figura 38–Gráfico de emissão Acústica, Vibração e Potência Ensaio 11.	78
Figura 39– (a) Desgaste Ensaio 5, (b) Desgaste Ensaio (6).	79
Figura 40–Gráfico de emissão Acústica, Vibração e Potência Ensaio 6.	79
Figura 41– (a) Desgaste de flanco V_b (mm) e (b) lascamento do Ensaio 19.....	80
Figura 42– (a) Desgaste de flanco V_b (mm) e (b) lascamento do Ensaio 20.....	81
Figura 43– (a) Desgaste de flanco V_b (mm) e (b) lascamento da ferramenta Ensaio 24.....	81
Figura 44–Gráfico de emissão Acústica, Vibração e Potência Ensaio 6.	82
Figura 45–Cavacos para ferramenta $Al_2O_3-Cr_2O_3$ ensaio 2, 4 e 5.....	83
Figura 46–Cavacos para ferramenta $Al_2O_3-Cr_2O_3$ ensaio 7, 9 e 11.....	83
Figura 47–Cavacos para ferramenta Al_2O_3-MgO ensaio 13, 14 e 15.....	84
Figura 48–Cavacos para ferramenta Al_2O_3-MgO ensaio 19, 21 e 23.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química do aço ABNT 52100.	22
Tabela 2 - Composição química do AÇO ABNT 52100 utilizado.....	49
Tabela 3 - Combinação experimental para os testes com as ferramentas de cerâmica de $Al_2O_3+Cr_2O_3$ e Al_2O_3+MgO	53
Tabela 4 - Análise de variância para Valores de Emissão máxima.....	59
Tabela 5- Análise de variância para Média da vibração versus ferramenta; V_c (m/min); a_p (mm)	62
Tabela 6 – Resultado teste de TUKEY fator a_p versus média vibração.....	64
Tabela 7- Análise de variância para Média da potência versus ferramenta; V_c (m/min); a_p (mm)	64
Tabela 8– Resultado teste de TUKEY média da potência versus a_p (mm).....	66
Tabela 9- Análise de variância para Potência Máxima (W) versus ferramenta; V_c (m/min); a_p (mm)	66
Tabela 10 – Resultado teste de TUKEY para máxima da potência versus a_p (mm).....	67
Tabela 11 - Análise de variância para R_a (um) versus ferramenta; V_c (m/min); a_p (mm).....	68
Tabela 12– Resultado teste de TUKEY para Rugosidade (R_a) versus a_p (mm).....	70
Tabela 13 - Análise de variância para R_t (um) versus Ferramenta; V_c (m/min); a_p (mm).....	71
Tabela 14– Resultado teste de TUKEY para Rugosidade (R_t) versus a_p (mm).....	73
Tabela 15 - Análise de variância para R_z (um) versus Ferramenta; V_c (m/min); a_p (mm).....	74
Tabela 16 – Resultado teste de TUKEY para Rugosidade (R_z) versus a_p (mm).....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APC	Aresta postiça de corte
ASM	<i>International (Formerly American Society for Metals)</i>
ASTM	<i>American Society for the Testing of Materials</i>
BS	<i>British Standards</i>
CBN	Nitreto cúbico de boro
Cr ₃ C ₂	Carboneto de cromo
DIN	<i>Din Deutsches Institut Fur Normung E.V.</i>
HRC	<i>Hardness Rockwell C</i>
IU	Índice de usinabilidade
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEV	Microscopias ópticas e eletrônicas de varredura
MQL	Mínima quantidade de lubrificante
PCBN	<i>PolycrystallineCubicBoronNitride</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SI	Sistema Internacional
SiN	Nitreto de Silício
SPD	Diamante policristalino sinterizado
TaC	Carboneto de tântalo
TiC	Carboneto de titânio
TiCN	Carbonitreto de titânio
TiN	Nitreto de titânio
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio
MgO	Óxido de Magnésio
Cr ₂ O ₃	Óxido de Cromo
WC	Carboneto de tungstênio
WC-Co	Carboneto de tungstênio e cobalto

LISTA DE SÍMBOLOS

L_f	comprimento de usinagem
V_c	velocidade de corte
rpm	rotação por minuto
V_f	velocidade de avanço
a_p	profundidade de usinagem
P_c	potência de corte
P	potência
F_c	Força de corte
F_f	força de avanço
F_p	força de profundidade
U_{cc}	tensão
EA_{RMS}	valor médio quadrático de emissão acústica
Vib	sinal de vibração
K_s	pressão específica de corte
f	avanço
m	metro
mm	milímetro
kW	quilowatts
mm/min	milímetro por minuto
mm/rot.	milímetro por rotação
m/min	metros por minuto
R_a	rugosidade aritmética média
R_t	rugosidade total do perfil
R_z	rugosidade máxima do perfil
L	lado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS	19
1.2 JUSTIFICATIVA	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 AÇO ABNT 52100	21
2.2 TRATAMENTO TÉRMICO.....	22
2.3 PROCESSO DE USINAGEM POR TORNEAMENTO	24
2.3.1 TORNEAMENTO AÇO ABNT 52100	30
2.4 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE.....	31
2.5 FERRAMENTAS CERÂMICAS	34
2.5.1 Cerâmicas a base Óxido de Alumínio.....	37
2.6 VARIÁVEIS DE SAÍDA.....	39
2.6.1 Rugosidade	40
2.6.2 Potência de corte.....	41
2.6.3 Vibração.....	43
2.6.4 Emissão acústica.....	44
2.6.5 Desgaste e Avarias da ferramenta	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1 DEFINIÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA	48
3.2 MATERIAIS PARA ESTUDO	49
3.2.1 Beneficiamento do Corpo de Prova	49
3.2.2 Equipamentos para Ensaio de Torneamento e Aquisição de Dados	50
3.2.3 Medição de Rugosidade	52
3.2.4 Ensaio de Usinagem.....	53
3.2.5 Tratamento dos Dados Obtidos	55
3.2.6 Análise de Vida e Desgaste das ferramentas	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1 EMISSÃO ACÚSTICA.....	59
4.2 VIBRAÇÃO	61
4.3 POTÊNCIA	64
4.3.1 Média da Potência	64
4.3.2 Máxima da Potência	66

4.4 RUGOSIDADE R_a , R_t e R_z	69
4.4.1 Rugosidade R_a	69
4.4.2 Rugosidade R_t	71
4.4.3 Rugosidade R_z	74
4.5 DESGASTE DAS FERRAMENTAS.....	77
4.5.1 Desgaste e avaria da ferramenta $Al_2O_3-Cr_2O_3$	77
4.5.2 Desgaste e avaria da ferramenta Al_2O_3-MgO	80
4.6 ANÁLISE DOS CAVACOS NOS ENSAIOS	82
5 CONCLUSÃO.....	86
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
REFERÊNCIAS	89
ANEXO I	95
ANEXO II	95

1 INTRODUÇÃO

Atualmente nota-se uma escalada dos processos de usinagem de aços endurecidos em função das vantagens que este tipo de usinagem proporciona. Em muitos casos, essas operações de usinagem são realizadas utilizando ferramentas de CBN, porém, seu custo elevado em relação as ferramentas cerâmicas proporcionam uma oportunidade de se realizar estudos buscando melhorias em outros materiais para ferramentas de corte.

O principal objetivo de se usinar aços endurecidos está em eliminar a etapa de retificação e garantir uma significativa redução nos custos de manufatura possibilitando realizar múltiplas tarefas em somente um ciclo de produção sem comprometer a qualidade dimensional do produto final. Apresentam ainda vantagens como o aumento da vida à fadiga da peça e pequenas alterações na sua microestrutura relacionada à dureza (IGBAL *et. al.*, 2008).

Os processos de usinagem vêm apresentando grande evolução devido às máquinas-ferramentas modernas com maior rigidez e possibilidade de se atingir altas velocidades de corte. Essa evolução também está relacionada pela inserção no mercado de ferramentas de corte com maior resistência ao desgaste a elevadas temperaturas. Essas novas classes de ferramentas de corte, juntamente com a evolução das máquinas ferramentas torna-se possível torner materiais endurecidos com melhor acabamento sem a necessidade de realização de retificação (GOMES *et al.*, 2017).

Devido às diversas variáveis envolvidas na usinagem de aços endurecidos, à usinabilidade desses materiais obriga ter um maior conhecimento das propriedades do material, ferramenta de corte, máquina ferramenta, para poder alcançar baixos valores de rugosidade e redução dos tipos e mecanismos de desgastes (LEANDRO, 2020).

Com a evolução de materiais de ferramentas de corte, como às de nitreto cúbico de boro (CBN), nitreto de silício, ferramentas a base de óxido de alumínio, revestimentos de alta dureza, juntamente com o desenvolvimento das máquinas operatrizes, a usinagem de aços endurecidos vem ganhado destaque (CHINCHANIKAR; CHOUDHURY, 2015).

Vários aspectos específicos influenciam a usinagem dessas ligas, sendo importante o conhecimento de processos, tipos e geometrias das ferramentas de corte, parâmetros de corte e outros (LEANDRO, 2020), (CAMPOS *et al.*, 2012), (SANTOS, 2021), (SHABANI *et al.*, 2021). A utilização de ferramentas cerâmicas na usinagem tem crescido nos últimos anos, por conta do desenvolvimento das máquinas ferramentas que, se mostram mais estáveis, rígidas e

capazes de trabalhar com altas velocidades. As ferramentas cerâmicas apresentam alta dureza em temperaturas elevadas (KREBS, 2019) (REDDY; SNG, 2019).

Este estudo se justifica devido ao fato de o processo de torneamento de aços endurecidos serem muito utilizados nas indústrias e também do aço ABNT52100 ter grande aplicação na indústria automotiva, contudo esse processo de usinagem geralmente é realizado utilizando ferramentas de CBN que possui uma grande desvantagem econômica em relação as ferramentas cerâmicas. O objetivo desse projeto é o estudo da usinagem por torneamento aço ABNT52100 endurecido utilizando duas ferramentas cerâmicas, uma base de $Al_2O_3+Cr_2O_3$ e a segunda à base de Al_2O_3+MgO . Com resultados busca-se reduzir custos e melhorar o acabamento das peças, tendo como consequência a redução de processos posteriores.

1.1 OBJETIVOS

Analisar a usinabilidade do aço ABNT 52100 endurecido no processo de torneamento, utilizando ferramentas cerâmicas experimentais de $Al_2O_3-Cr_2O_3$ e Al_2O_3-MgO . Essa análise foi realizada verificando o comportamento de variáveis de saída do processo como rugosidade, desgaste, avarias e vida da ferramenta, potência de usinagem, vibração, emissão acústica, tipo e formas de cavaco.

Os objetivos específicos foram:

- Analisar o comportamento da rugosidade (R_a , R_t e R_z) das peças usinadas de aço ABNT52100 endurecido para as diferentes ferramentas de corte;
- Analisar o desgaste, as avarias e a vida das ferramentas para as diferentes condições de ensaio;
- Verificar a potência consumida, a emissão acústica e a vibração gerada durante o torneamento, para as diferentes condições de ensaio;
- Analisar os efeitos dos parâmetros de usinagem (velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de usinagem) no torneamento com estas ferramentas cerâmicas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os processos de usinagem dos aços endurecidos com ferramentas cerâmicas vêm se tornando a cada dia mais importante devido à redução de fluidos de corte, melhoria do tempo de vida das ferramentas e melhor acabamento superficial reduzindo processo posteriores.

Nesse projeto o prospecto é ainda mais desafiador, pois tem em seu legado a utilização de ferramentas cerâmicas desenvolvidas com tecnologia nacional e de baixo custo.

Como fator posterior estas ferramentas necessitam serem testadas com diferentes parâmetros e ligas para que se possam encontrar as melhores condições de usinagem. Estas ferramentas vêm sendo testadas em diferentes ligas, mas ainda precisam várias ações para poder alcançar um campo de aplicações maior. Várias decisões vêm sendo estudadas pelo grupo de usinagem da Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá. Sabe-se que as ferramentas cerâmicas podem ampliar e/ou melhorar seu campo de aplicações.

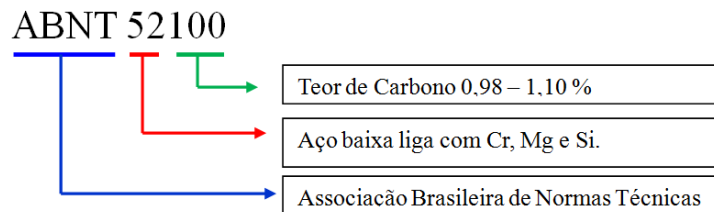
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇO ABNT 52100

O aço ABNT 52100 tem uma alta temperabilidade, resistência ao desgaste e dureza. Seu uso restringe-se a temperaturas até 150°C, gerando a redução da dureza. Apresenta má soldabilidade e alta resistência a desgastes. Pode ser usado em esferas, roletes e pistas de rolamento, anéis de rolamento, entre outras. É um aço construtivo de alto teor de carbono, ligado ao cromo, usado para beneficiamento quando se busca obter a alta dureza (PASCHOALINOTO *et al.*, 2012).

O aço utilizado nesta pesquisa foi o ABNT 52100, que tem como característica seu elevado teor de carbono além de ser ligado ao cromo e pode ser classificado conforme a Figura 1.

Figura 1- Classificação ABNT 52100 (aços baixa-liga).



Fonte: Adaptado pelo autor.

O aço ABNT 52100 é uma liga com boa usinabilidade em condições recozidas e possui alta dureza no estado tratado termicamente. Foi introduzido nos anos 1900 e ainda é utilizado em pistas de mancais e rolamentos (BARCELOS, 2019). Nos estudos de Oliveira *et al.* (2018), é possível concluir que este aço é usado em ferramentas para trabalho a frio, como brocas, machos, alargadores, punções, ferramentas para extrusão a frio, para madeira, entre outros exemplos, porém seu uso se dá em componentes de rolamentos, como na confecção de esferas e agulhas. A composição do aço ABNT 52100 é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1- Composição química do aço ABNT 52100.

Material	Elementos	%
ABNT 52100	C	0,98- 1,10
	Mn	0,38-0,41
	Si	0,16-0,32
	Cr	1,39-1,43
	Ni	0,07
	Mo	0,02
	Cu	0,12
	Sn	0,017-0,06
	p	0,019-0,12

Fonte: Adaptado de Furtado *et al.* (2018).

É um aço ao cromo com alto teor de carbono que, em geral, é fabricado a partir de um processo de fusão de indução a vácuo que oferece alta capacidade de carga dinâmica e maior confiabilidade, por conta dos níveis de inclusão menores. Para os tamanhos de rolamento maiores, especialmente em relação à espessura da seção transversal, foram introduzidas mudanças com o silício, molibdênio e manganês (BARCELOS, 2019).

2.2 TRATAMENTO TÉRMICO

As propriedades de um material de Engenharia definem a sua resposta às várias formas de energia que são aplicadas nos processos fabris. Se o material responder adequadamente às temperaturas, forças e demais parâmetros físicos de um processo, o resultado é bem-sucedido, que produz uma peça de qualidade (GROOVER, 2012). A dureza de um material é a resistência do material a uma deformação plástica localizada e esse material com boa dureza resiste ao riscamento e desgaste (SANTOS, 2021).

A dureza dos metais pode ser maior a partir de tratamentos especiais, como trabalho a frio, adição de soluto, endurecimento por precipitação, entre outros. Existe uma ligação próxima entre o limite de escoamento dos metais e a dureza (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

O aço ABNT 52100 é um aço muito utilizado para fabricação de rolamentos e possui como características fundamentais dureza a temperatura ambiente, resistência ao desgaste e temperabilidade e de acordo com Bhadeshia (2012) materiais com concentração de carbono entre 0,8 a 1,1% e a solução substitucional menor de até 3% são utilizadas como aço ferramenta e podem obter estrutura martensítica a ser temperados por óleo e sal e além de tempera podem sofrer tratamentos de normalização e recozimento. Esses aços com a dureza na faixa 59-66 HRC demonstra se correlacionar positivamente com a vida em fadiga nas áreas de

contado do rolamento demonstrando que maiores durezas proporcionam menores desgastes nas pistas do rolamento (BHADESHIA, 2012).

O tratamento térmico é um processo complexo que envolve operações de aquecimento e resfriamento em materiais como aços. Esses processos são realizados sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento e tem como objetivo alterar suas propriedades. Essas propriedades podem ter seu comportamento alterado durante a fabricação e seu desempenho, durante a vida, depende da sua composição, estrutura e do tratamento térmico que o componente foi submetido. Segundo Kalpkjian e Schmid (2009), as propriedades como dureza, ductibilidade, tenacidade e resistência ao desgaste são influenciadas não somente pelos elementos de liga mais também por seus tratamentos térmicos modificando suas estruturas e induzindo transformações de fases que influenciam nessas propriedades.

O aço ABNT 52100 quando beneficiado por tratamentos térmicos podem atingir elevada dureza, entre 62 – 66 HRC. É um aço temperável em óleo e para seu beneficiamento, podem-se utilizar os seguintes processos e parâmetros:

Recozimento: Por seu elevado teor de carbono deve sofrer recozimento de esferoidização para otimizar sua usinabilidade. A esferoidização é realizada em torno de 750°C por tempos variando entre 15 e 20 horas. Resfriar no forno.

Normalização: O tratamento deve ser feito na temperatura próxima de 870 – 890°C por no mínimo 1 hora para cada 25 mm. Resfriar ao ar. Em casos especiais pode se utilizar ar forçado.

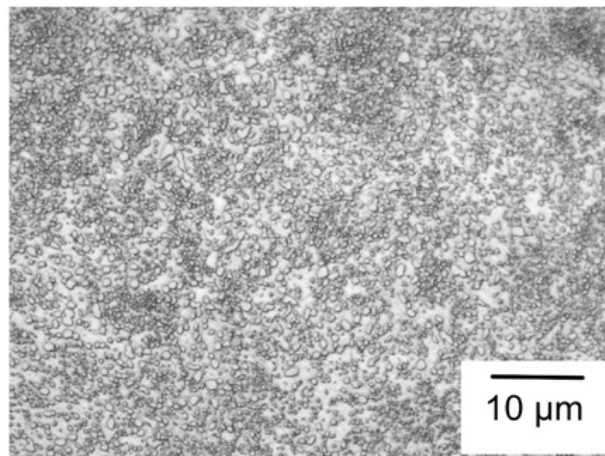
Têmpera: A austenitização para a têmpera deve ser realizada entre 840 – 850°C, manter pelo tempo necessário para homogeneizar a temperatura na seção transversal e resfriar em óleo.

Revenimento: Deve ser realizado imediatamente após a têmpera quando a temperatura atingir cerca de 70°C. O revenimento é realizado em temperaturas entre 120 – 200°C. A temperatura usual de revenimento é em torno de 150°C. Nestas condições não há queda significativa da dureza. No revenimento a cerca de 180°C a dureza pode cair de 1 a 2 pontos HRC.

Aços fornecidos para fabricantes de rolamentos podem ter a forma de tubos ou em peças forjadas à frio partindo de uma microestrutura obtida por recozimento de esferoidização. Entretanto, é comum o aço ser fornecido na condição de laminado a quente com microestrutura perlítica incluindo alguma cementita proeutetóide nos contornos de grão neste caso o tratamento de esferoidização se faz necessário.

O objetivo do recozimento de esferoidização é facilitar a usinagem e operações de conformação à quente e à frio, através da indução de uma microestrutura que é uma mistura de partículas relativamente grosseiras de cementita e ferrita. A rugosidade da superfície usinada também é reduzida no processo. A esferoidização do aço para rolamento reduz a dureza do mesmo para aproximadamente 230HV (BHADESHIA, 2012). A microestrutura de carbonetos esferoidizados em uma matriz de ferrita do aço ABNT 52100 é ilustrada na Figura 2.

Figura 2- Microestrutura aço ABNT 52100 após esferoidização.



Fonte: Bhadeshia (2012).

2.3 PROCESSO DE USINAGEM POR TORNEAMENTO

Os processos de corte são um importante grupo de técnicas usadas na fabricação de materiais metálicos e não metálicos, esses processos incluem torneamento, fresamento, furação, rosqueamento. O objetivo desses processos é manufaturar o produto com alto grau de eficiência e qualidade sem desperdícios de tempo e custo apropriado.

Os desenvolvimentos tecnológicos de máquinas-ferramenta e as novas ferramentas de corte possibilitam a retirada de cargas de aços endurecidos por processos de torneamento e fresamento (SIRAJ; DHARMADHIKARI; GORE, 2018). Segundo estudos de Shabani et al. (2021), o torneamento de materiais endurecidos oferece grandes vantagens em relação a maior taxa de remoção, menor tempo de configuração e custo produtivo, tornando-se um substituto significativo para retificação convencional.

As propriedades do material usinado influenciam no sucesso operacional da usinagem, essas e demais características são frequentemente resumidas pela “usinabilidade”. Este termo indica a facilidade com que um material consegue ser usinado usando ferramentas e condições de corte adequadas (GROOVER, 2012). Por meio da usinabilidade de um material é possível

definir variáveis associadas ao processo, como acabamento superficial, vida da ferramenta, produtividade, estabilidade química do material, dentre outras (GABALDO, 2019). Para Wrasse (2017), a usinabilidade de um material é caracterizada como uma grandeza tecnológica, que demonstra por valores numéricos comparativos ou por propriedades de usinagem de um material, comparado ao padrão.

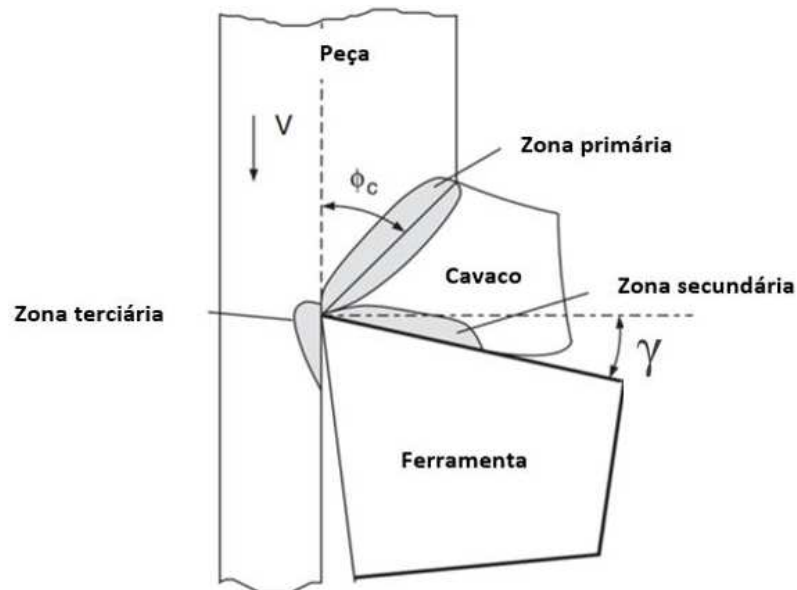
O desempenho ao longo da usinagem de um material de teste é mensurado em relação ao material-base ou material-padrão. A performance relativa é apresentada como um índice numérico, conhecido como índice de usinabilidade (IU). O material utilizado como padrão possui um IU igual a 1,00. O aço B1112 é usado como material-padrão em relação a usinabilidade. Os materiais que são simples de usinar têm índices superiores a 1,00, e os difíceis possuem índices menores que 1,00 (GROOVER, 2012). O IU é uma grandeza tecnológica comparativa (KREBS, 2019).

Segundo Trent e Wright (2000), a usinabilidade dos materiais nas operações de usinagem, dependem de como o rendimento da usinagem é afetada pelas deformações, que surgem juntos com as características das propriedades geradas após a deformação que depende da relação entre o fluxo e o calor gerado durante a deformação plástica na usinagem.

Uma peça gerada pelo torneamento provém da remoção com uma ferramenta de ponta única que ao entrar em contato com um material rotacional, produz uma textura helicoidal. O acabamento superficial e tolerância dimensional sofre influência do tamanho do raio da ponta e demais condições de usinagem (ALVES, 2019). Portanto, abrange vários fenômenos associados que interagem de maneira próxima (OSTERGLLAVA *et al.*, 2021).

Segundo os estudos de Alves (2019), ao longo do processo de torneamento, há três regiões de deformação no corte conforme a aresta da ferramenta penetra na peça. O material à frente da ferramenta é cortado na zona de cisalhamento primário compondo o cavaco. Esse material cortado se deforma parcialmente e move durante a face inclinada da ferramenta, conhecida como zona de deformação secundária. A área de atrito, em que o flanco está em contato com a superfície recém-usinada, é classificada como zona terciária, como apresentado na Figura 3. As regiões primária e terciária influenciam na zona de deformação secundária. As mudanças na camada subsuperficial, inclusive deformação plástica e mudanças de fase, geradas por mudanças térmicas, levam a modificações de microdureza.

Figura 3-Zonas de deformação no processo de corte.



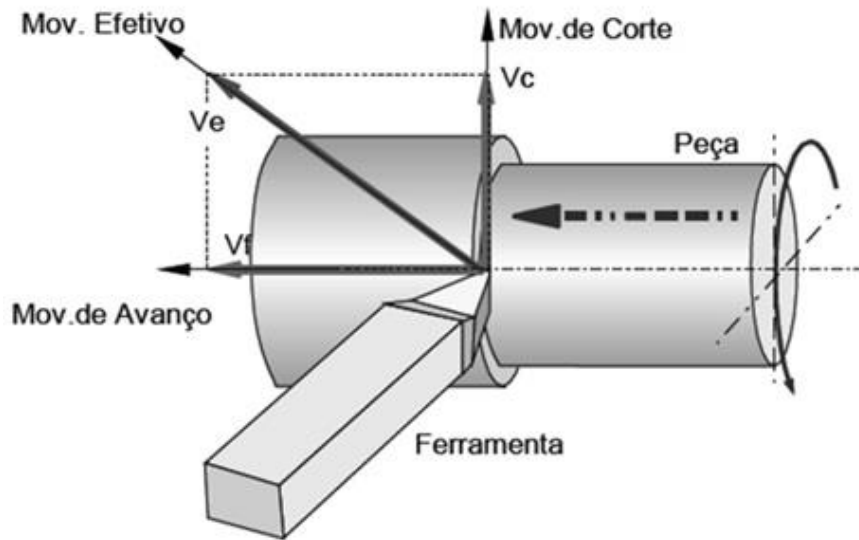
Fonte: Alves (2019).

A operação de torneamento traz a maneira adequada de se usinar peças cilíndricas. Já a qualidade das superfícies gerada pelo torneamento é suficiente para substituir a retificação em diversas aplicações (REDDY; SNG, 2019). Conforme os estudos de Amorim (2002), o processo de torneamento é um processo cuja operação de corte requer o ajuste de três parâmetros: velocidade de avanço (V_f), Velocidade de corte (V_c) e profundidade de corte (a_p).

A Velocidade de corte (V_c) é a taxa na qual a superfície não cortada da peça passa pela aresta de corte da ferramenta, expressa normalmente em m/min. (ALMEIDA, 2020).

A velocidade de avanço (V_f) é o percurso da ferramenta em cada volta expressa no caso do torneamento em mm/rot. e a profundidade de corte (a_p) é uma grandeza de penetração que expressa a largura ou profundidade da ferramenta em relação a peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Na Figura 4, são apresentadas as direções dos movimentos no torneamento.

Figura 4- Movimentos e direções no torneamento.



Fonte: Almeida (2020).

A velocidade empregada no torneamento V_c (velocidade de corte) é a principal variável de influência na determinação da vida da ferramenta, muito mais que o avanço e a profundidade de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). As implementações de velocidades muito altas podem gerar problemas relacionados à vibração excessiva, assim como problema na vida dos componentes do maquinário, afetando a segurança da operação e o sucesso do processo. Ainda que haja a necessidade de produção em grandes quantidades em sistemas de linha de produção, deve-se haver um estudo e considerações com critérios minuciosos com relação às condições e formas para aumento da produção por meio do aumento da velocidade de corte e no custo final empregado por essa decisão. Para a usinagem de determinados materiais, podem ser utilizados ferramentas de metal-duro com revestimentos, ferramentas cerâmicas e até mesmo ferramentas de PCBN (*Polycrystalline Cubic Boron Nitride*), sendo assim possível programar altas velocidades sem a preocupação com desgaste excessivo da ferramenta e excesso de vibração no processo por conta da condição de dureza fornecida por esses materiais (STEMMER, 2006).

O a_p é o parâmetro de penetração da ferramenta medida perpendicularmente ao plano de trabalho, que é definido pelas direções de avanço e velocidade da ferramenta. É o parâmetro de menor influência sob a vida da ferramenta, pois a mesma é limitada pela quantidade de material que será removido, combinados à potência do maquinário empregado, a rigidez do sistema, as características da ferramenta, a qualidade da superfície de contato e a precisão necessária para a execução do referido avanço (TEDESCO, 2007). Apesar disso, as variações no avanço têm caracterização importante na determinação da vida útil, ao passo que

a redução desse avanço fornece ganhos significativos na qualidade da peça, cuja velocidade é determinada pela equação abaixo, onde V_f é a velocidade de avanço, f_n o percurso do avanço em cada rotação, e n o número de rotações por minuto sendo representada pela Equação 1.

$$V_f = f_n \times n \text{ (mm/min.)} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

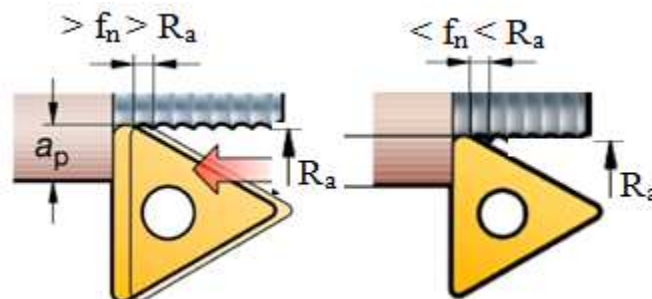
V_f = Velocidade de avanço (mm/min.)

F_n = Percurso do avanço por rotação (mm)

n = rotação por minuto (rpm)

Em alguns casos, a V_f pode ser representada diretamente como a distância percorrida pela ferramenta por revolução da peça e é representada em mm/rot. (Milímetros por rotação). Este é um fator muito importante que juntamente com o raio de ponta da ferramenta definem a rugosidade superficial da peça usinada. Com avanços menores se obtém melhor acabamento superficial pela diminuição dos picos na superfície, conforme exemplificado na Figura 5.

Figura 5- Representação dos movimentos de avanço x rugosidade.



Fonte: Adaptado Sandvik (2019).

Neste processo, há inúmeros fatores que interferem no comportamento do corte, como variáveis da peça de trabalho, variáveis da ferramenta e condições de corte. As variáveis de ferramenta são basicamente o material, geometria da aresta de corte, dentre outros, enquanto as de peça de trabalho consideram material, propriedade físicas, químicas e mecânicas. Além disso, as condições de corte consideram velocidade de corte, taxa de avanço e profundidade de corte. A classificação de parâmetros de qualidade é complexa, mas, é muito importante para o controle do processo usinagem, para que haja um produto de qualidade e com custo competitivo (SIRAJ; DHARMADHIKARI; GORE, 2018).

A tecnologia de torneamento em materiais endurecidos, tornou-se relevante no processo fabril e é usada para diversas aplicações industriais, como eixos, engrenagens, peças forjadas, matrizes e moldes (CAMPOS *et al.*, 2012). São voltados para materiais com dureza acima de 45 HRC, usando baixos valores de avanço e profundidade de usinagem e tem se tornado uma possibilidade viável para substituir o processo de retificação (GOMES *et al.*, 2017).

Segunda Panda *et al.* (2018) o torneamento de materiais endurecido se refere a materiais com dureza entre 45-68 HRC e são realizados com insertos de metal duro com ou sem revestimentos, CBN, PCBN ou insertos de cerâmica. As altas temperaturas geradas na zona de corte resultam num aumento de desgaste de flanco e de cratera quando se combina altas velocidades de corte, avanço e profundidade de corte e a deformação plástica na ponta da ferramenta resulta em problemas dimensionais e acabamento superficial. Para minimizar estas dificuldades e para a melhoria qualidade de superfície, bem como para diminuir o custo de produção muitos estudos são necessários afim de desenvolver novos materiais de ferramentas de corte com maior dureza, maior resistência mecânica, resistência à fratura, resistência ao choque térmico, resistente à abrasão, resistência à aderência difusão (KHATAI *et al.*, 2022)

Em muitos casos o uso de MQL (Mínima quantidade de lubrificante) é empregado principalmente quando se utiliza ferramentas de CBN, PCBN e Cerâmicas, o uso dessa técnica permite atingir melhores acabamentos superficiais e a possibilidade de redução de custos de produção e a poluição ambiental.

Conforme as pesquisas de Boing *et al.* (2019), o desenvolvimento de máquinas-ferramenta de alta rigidez e estabilidade dinâmica junto aos materiais de ferramentas como PCBN e cerâmica viabilizou a usinagem de peças endurecidas. Desde a década de 1980, o torneamento duro tem sido utilizado para aperfeiçoar os processos de fabricação de rolamentos e componentes de transmissões. Desta forma, o processo é usado em operações de acabamento que necessitam de alta precisão dimensional com um acabamento superficial restrito.

A utilização bem-sucedida do torneamento em aços endurecidos, ressalta diversas preocupações associadas à máquina-ferramenta, ferramentas de corte, condições de refrigeração, força de corte, dentre outras (ZHANG; WU, 2017). Em peças altamente endurecidas surgiu como uma nova abordagem na ciência da usinagem para aumentar a produtividade e rendimento pela redução do tempo produtivo e custos processuais. Por esse método, é possível que o acabamento e a usinagem principal sejam feitos simultaneamente (SIRAJ; DHARMADHIKARI; GORE, 2018). Conforme os materiais para ferramentas de corte surgem, o processo de torneamento de aços endurecidos tem sido estudado, para

substituir o processo de retificação (GONÇALVES *et al.*, 2018).

2.3.1 Torneamento Aço ABNT 52100

Tradicionalmente a usinagem de um metal significa cortar ligas de aços e ferros fundidos. Entretanto, nas indústrias atualmente é possível encontrar outros materiais muito diferentes das ligas tradicionais como aços inoxidáveis, ligas resistentes ao calor e superligas além dos materiais não ferrosos como ligas de alumínio. A usinabilidade indica a facilidade que um material pode ser cortado a baixo custo classificando essa propriedade com um material de referência nos indicando problemas potenciais com formação de cavaco, força de corte, temperatura, desgaste da ferramenta e qualidade superficial (DE VOS; STHAL, 2014).

O torneamento de materiais endurecidos vem sendo estudado ao longo dos anos, por apresentar a vantagem de se eliminar a etapa de retificação considerada de alto custo tornando assim o processo mais competitivo e sustentável. O aço ABNT 52100 é utilizado em larga escala na indústria principalmente na fabricação de rolamentos e após tratamentos têm-se a necessidade de se usinar em altas durezas necessitando de um ciclo contínuo de melhorias em ferramentas de corte e de um conhecimento profundo de se usinar esse material. Segundo Revel *et al.* (2016), torneamento do aço AISI 52100 permite obter uma rugosidade superficial baixa e melhorar a integridade superficial da região usinada aumentando o tempo de vida dos componentes fabricados quando solicitados a fadiga.

Um extenso estudo realizado de Poulachon *et al.* (2003), para investigar o comportamento do desgaste das ferramentas de CBN durante o torneamento de vários aços endurecidos utilizando o desgaste de flanco (V_b) para medir e classificar a taxa de desgaste em diferentes aços endurecidos e as ranhuras geradas no flanco da ferramenta foram correlacionadas com o teor de carbonetos nos materiais usinados. Neste estudo, para o aço AISI 52100 usinado com dureza próxima de 54HRC apresentou ranhuras no flanco próximas de 1 μ m representando o tamanho dos carbeto primários contidos na microestrutura, porém, apresentou um desgaste contínuo e homogêneo se comparado a outros aços. O estudo apresentou também que os desgastes de cratera estudados apresentaram a indução de desgaste químico no corpo da ferramenta.

Um estudo realizado por MEDDOUR *et al.* (2015), investigou a influência das variáveis de entrada, velocidade de corte (V_c), profundidade de usinagem (a_p) e velocidade de avanço (v_f) na usinagem do aço AISI 52100 utilizando ferramentas cerâmicas mistas obtendo como respostas os resultados do esforços de corte e acabamento superficial. As componentes das

forças foram significativamente influenciados pela profundidade de usinagem. Observou-se que a velocidade de avanço também foi influente, porém, com menor contribuição. Já a velocidade de corte (V_c) não demonstrou influência acerca dos esforços de corte. A força passiva se demonstrou como o maior elemento dos esforços de corte para menores profundidades de usinagem, seguida da força de corte e avanço, respectivamente .

O torneamento de materiais endurecidos é um processo de usinagem que busca minimizar os processos como retificação e polimento e analisando a usinagem do aço AISI 52100 com dureza média de 62 HRC usando ferramentas de CBN a partir dos efeitos dos parâmetros de corte. Para assegurar a estabilidade do processo de usinagem analisou-se a qualidade superficial por meio da rugosidade, desempenho e rigidez dos eixos X e Z nas máquinas-ferramentas e análise de mudanças na microestrutura do material (REVEL *et al.*, 2016).

2.4 MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE CORTE

Com o mundo da manufatura em constante transformação e com o surgimento de novos materiais é fundamental uma seleção criteriosa das ferramentas de corte garantindo a qualidade do produto final usinado e evitando desperdícios. De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013), alguns fatores devem ser considerados para seleção das ferramentas como o material a ser usinado, processo de usinagem, condição da máquina, forma e dimensões da ferramenta, custo do material da ferramenta e condições de usinagem. Em operações como de desbaste onde se tem condições mais severas de usinagem como camadas endurecidas, superfícies irregulares e cortes interrompidos se faz necessário o uso de ferramentas com maior tenacidade e em operações de acabamento onde se tem maiores velocidades de corte com avanços menores se faz necessário o uso de ferramentas mais resistentes ao desgaste.

Nos últimos anos, por conta da necessidade dos materiais para ferramentas de corte mais resistentes ao desgaste surgiram materiais desenvolvidos que revolucionaram o corte de metais, sustentados nos desenvolvimentos de recobrimentos de menores espessuras (TAMAYO *et al.*, 2016).

Independentemente do tipo do material da ferramenta é necessária uma avaliação geral do processo levando em consideração produtos com geometrias complexas que apresentam cortes interrompidos, excentricidade e que dificultam o sistema de fixação gerando vibrações que podem influenciar diretamente na vida da ferramenta e na qualidade do produto que se deseja obter. Contudo, independente das citadas acima às ferramentas de corte necessitam

ainda apresentar algumas características em comum como: dureza a quente, resistência ao desgaste, boa tenacidade, estabilidade química e resistência aos choques térmicos no caso ferramentas utilizadas em fresamento (NIU *et al.*, 2019).

Segundo Groover (2012), o desenvolvimento cronológico dos materiais de ferramenta seguiu uma vertente em que novos materiais permitiram que velocidades de corte mais altas fossem alcançadas. Na prática, as máquinas-ferramenta nem sempre mantem o mesmo ritmo de avanço tecnológico das ferramentas de corte. As limitações na potência, rigidez das ferramentas, mancais de eixos rotacionais, e a utilização generalizada de equipamentos obsoletos corroboram para subutilizar as velocidades maiores para as ferramentas de corte disponíveis. No mercado não existe uma forma geral de classificar as ferramentas, entretanto, se considerar a ordem cronológica, ordem crescente de dureza a quente, entre outros, pode ser reunida.

Taylor é uma grande figura na história das ferramentas de corte. Por volta dos anos 1880 em Midvale Steel e depois em Bethlehem Steel, ele passou a realizar vários experimentos que duraram um quarto do século, gerando um entendimento maior do processo de corte dos metais. Entre os desenvolvimentos gerados estava o aço rápido, uma classe de aços ferramenta de alta liga que permitiam velocidades de corte substancialmente maiores do que as ferramentas de corte anteriores. (GROOVER, 2012).

O aço rápido consegue manter a dureza em altas temperaturas com comportamento melhor do que o aço com alto teor de carbono e os de baixa liga. Sua boa dureza a quente possibilita que as ferramentas de aço rápido possam ser utilizadas em velocidades de corte maiores. Uma diversidade de aços rápidos está disponível no mercado, porém podem ser divididos em dois tipos: de tungstênio, designados pela categoria T e os de molibdênio, designado pela categoria M (GROOVER, 2012).

Comercialmente, o aço rápido é um dos materiais para ferramenta mais relevantes, embora tenha sido introduzido há mais de um século. O aço rápido é voltado para aplicações que consideram ferramentas com geometrias complexas, como fresas, brocas. Essas formas complexas são possíveis de se obter de maneira fácil e barata na condição não endurecida se comparado aos outros materiais para ferramentas que necessitam de processos especiais para se obter geometrias complexas. Posteriormente, a ferramenta fabricada em aço rápido pode ser tratada termicamente para que a dureza da aresta de corte seja obtida garantido que seu interior continue com boa tenacidade (GROOVER, 2012).

Os metais duros são constituídos por um ou mais carbeto unidos por uma matriz metálica usando técnicas de processamento de particulados. Os mais comuns são compostos

por carboneto de tungstênio (WC), carboneto de titânio (TiC) e/ou carboneto de cromo (Cr_3C_2). O carboneto de tântalo (TaC), entre outros são menos recorrentes. Os ligantes metálicos básicos são o níquel e cobalto (GROOVER, 2012). Os *cermets*, em tecnologia de ferramentas de corte concentram-se nas combinações de TiC, nitreto de titânio (TiN) e Carbonitreto de titânio (TiCN), tendo níquel e/ou molibdênio como ligantes (SANTOS, 2021).

As primeiras ferramentas de corte de metal duro foram criadas a partir de carboneto de tungstênio e cobalto (WC-Co) e podiam ser usadas para usinar ferro fundido e materiais não metálicos com velocidades maiores que as possíveis, como ligas fundidas e aço rápido. Entretanto, quando estas ferramentas eram usadas para cortar aço, o desgaste de cratera acontecia rapidamente, gerando falha precoce. A forte afinidade química entre o aço e carbono do WC resultava no desgaste pela difusão e a uma reação química na interface cavaco-ferramenta para a peça-ferramenta. Depois disso, foi descoberto que a adição de TiC e TaC ao WC-Co retarda a taxa do desgaste de cratera no aço (GROOVER, 2012).

O desenvolvimento de carbonetos revestidos foi por volta dos anos 70 e caracterizou um grande avanço tecnológico no setor de ferramentas de corte. O metal duro com recobrimento é um inserto de metal duro com uma ou mais camadas finas de material resistente ao desgaste. Já o revestimento é utilizado no substrato por deposição química de vapor ou deposição física de vapor, sendo verificado que quando mais espessos tendem a ser mais frágeis, criando trincas e lascamentos (GROOVER, 2012). De modo geral, conforme os estudos de Santos (2021), os metais duros possuem uma boa combinação entre propriedades como dureza a quente e resistência ao desgaste com resistência mecânica e tenacidade.

Os metais duros revestidos são utilizados para usinar ferros fundidos e aços em operações de fresamento e torneamento. São bem aplicados quando em altas velocidades, em situações em que a força dinâmica e choque térmico são menores. Se as condições forem severas, como em algumas operações de corte interrompida, o lascamento do revestimento pode acontecer, gerando uma falha prematura. O uso de ferramentas de metal duro revestidas tem crescido em metais não ferrosos e materiais não metálicos para expandir a vida útil e permitir maiores velocidades (GROOVER, 2013).

O Nitreto cúbico de boro (CBN) segundo Groover (2012), possui várias estruturas como o carbono. As estruturas relevantes são: hexagonal, similar à grafita, e cúbica, como o diamante; ademais, sua dureza é análoga à do diamante. Por conta da sua grande dureza são usadas em ferramentas de corte e abrasivos de rebolos.

É um dos materiais mais duros conhecidos e sua fabricação em insertos para ferramenta de corte é basicamente igual do diamante policristalino sinterizado (SPD) bem como no

revestimento em insertos de WC-Co. Não reage quimicamente com o ferro e níquel e, desta forma, as revestidas com este material são utilizadas na usinagem do aço e ligas de base de níquel (GROOVER, 2012).

Os primeiros diamantes industriais foram criados pela *General Electric Company* em 1954, que são monocristalinos usados em operações de retificação. A maior aceitação das ferramentas de corte diamantadas acarretou a utilização do SPD no início dos anos 1970 (GROOVER, 2013).

Conforme os estudos de Groover (2012), o diamante é voltado para a usinagem e lixamento de metais não ferrosos. De acordo com algumas medidas de dureza, o diamante é três a quatro vezes mais duro que o WC ou óxido de alumínio. Quando a dureza é o maior desejo de uma ferramenta, é comum pensar no diamante para operações de usinagem e retificação. O SPD é desenvolvido pela sinterização de cristais de grãos finos de diamante sob altas pressões e temperaturas, na geometria buscada. Os cristais possuem orientação aleatória, o que eleva a tenacidade das ferramentas de diamante policristalino em relação aos monocristais de diamantes. Podem ser usados na usinagem a alta velocidade de metais não ferrosos e abrasivos não metálicos, como grafite, madeira e fibra de vidro. Diante disso, Santos (2021) complementa que a usinagem do aço, de outros metais ferrosos e ligas baseados em níquel com ferramentas SPD é impraticável, por conta da afinidade química entre os metais e carbono do diamante.

2.5 FERRAMENTAS CERÂMICAS

As ferramentas de corte em cerâmicas são constituídas, especialmente por grãos finos de óxido de alumínio (Al_2O_3), que são prensados e sinterizados a altas pressões e temperaturas, voltadas para o torneamento em altas velocidades para ligas de ferro (SANTOS, 2021).

Os materiais cerâmicos são citados nas literaturas como ferramentas de corte desde a década de 50, mais só na década de 80 com o avanço dos materiais cerâmicos passou a ocupar um lugar no mercado de ferramentas de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

A primeira patente da cerâmica a base de alumina aconteceu em 1912, com teor acima de 99%, e seu processamento seguiu a rota de prensagem a quente e uso de pequena quantidade de agente sinterizante (SOUSA, 2020).

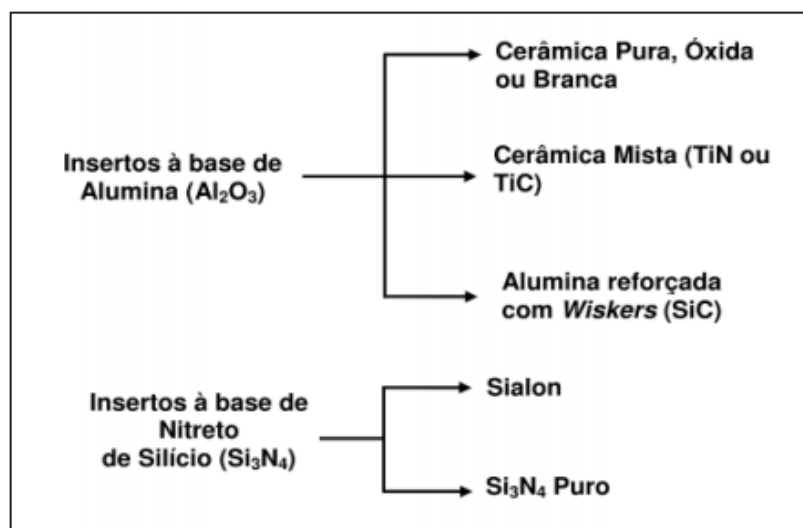
Atualmente os pesquisadores tem prestado atenção nas ferramentas de cerâmica. Essas ferramentas podem reduzir o custo vinculado a usinagem e ajudar na qualidade do produto e eficiência de produção (LI; LI, 2017). As cerâmicas possuem algumas propriedades relevantes

como: alta rigidez, dureza, dureza a quente, resistência à compressão e densidade relativamente baixa, porém existem desvantagens como: baixa tenacidade e resistência à tração em amostras tridimensionais. (GROOVER, 2012).

As ferramentas produzidas a partir de cerâmicas avançadas, se dividem em dois grupos. As cerâmicas a base de alumina (Al_2O_3) chamada de cerâmicas óxidas e as de Nitreto de Silício (Si_3N_4) conhecidas como cerâmicas não óxidas. (MACHADO et al., 2009).

Segundo Campos (2011), o grupo de ferramentas constituído por insertos confeccionados à base de cerâmica é criado para diversas classes de insertos, desmembrados em dois grupos diante do material usado como matriz, como apresentado na Figura 6.

Figura 6- Divisão de materiais cerâmicos para ferramentas de corte.



Fonte: Campos (2011).

As ferramentas de cerâmicas aplicadas como ferramentas de corte não são simples de serem usadas, a baixa condutividade térmica influencia na transferência de calor do que a região próxima do contato da ferramenta obtenha altas temperaturas e a baixa tenacidade ajuda na propagação de trincas e na quebra da ferramenta, entretanto, durante os anos foram realizados inúmeros esforços para aperfeiçoar a tenacidade e ter bons resultados.

A adição de óxido de magnésio em cerâmicas à base de óxido de alumínio minimiza a temperatura de sinterização e tamanho do grão; além disso, a mesma adição, em quantidades menores, possibilitou que o óxido de alumínio sinterizasse até próximo a densidade teórica e favorável para inibir o desenvolvimento descontínuo do grão (ARAB *et al.*, 2019).

Kondo et al (2018), estudaram a otimização dos parâmetros de usinagem para potência de corte e rugosidade no torneamento da superliga VAT 32[®] utilizando ferramentas experimentais a base de óxido de alumínio dopada com óxido magnésio. Os resultados se mostra-

ram promissores atingindo baixos valores de rugosidade R_a e permitindo usinar em velocidades de corte acima das praticadas para superligas.

A cerâmica mista integra o grupo de ferramentas cerâmicas à base de alumina, com 25 a 40% de carboneto de titânio em volume, com uma segunda fase dispersa na matriz de alumina, conhecida como cerâmica preta. Outra composição, possui em torno de 23% em peso de TiN mais TiC disperso na matriz de alumina, de cor marrom escuro e tem maior resistência à ruptura transversal, maior condutividade e dureza. A cerâmica mista apresenta uma dureza a quente maior que de outras ferramentas à base de alumina, podendo ser usada na usinagem de aço temperados e ferros fundidos de alta dureza (CAMPOS, 2011). Dentre as outras cerâmicas comerciais usadas como material de ferramenta de corte consideram o SiN, o *sialon*, óxido de alumínio com carboneto de titânio e óxido de alumínio reforçado com monocristais de carboneto de silício. A base de óxido de alumínio é desmembrada em cerâmicas puras, mistas e alumina reforçada com os monocristais e a base de SiN (GROOVER, 2012).

De acordo com Li e Li (2017), o teor de óxido de alumínio deste tipo de cerâmica ultrapassa 99%, e pela adição de 0,1% -0,15% de óxido de vidro, a ser realizado por prensagem a frio ou quente. Para Salacinski *et al.* (2018), as cerâmicas puras são compostas de óxidos e de grãos finos de óxido de alumínio que possuem óxido de magnésio inibindo o crescimento dos grãos. Já os óxidos de titânio, cromo e níquel eleva a resistência mecânica e alumina com baixos percentuais de óxido zircônio aumentando a tenacidade do material.

A soma de partículas não oxidadas como TiC e TiN na matriz de alumina que gerou um crescimento na condutividade térmica, resistência ao choque térmico e dureza das cerâmicas. Há diversos estudos acerca da melhoria no desempenho de ferramentas de corte, além da adição de cromo, alumina reforçada com pó de TiCN com relação TiC (GEVORKYAN *et al.*, 2020).

Devido a fragilidade do material cerâmico alguns cuidados devem ser tomados em relação a construção da ferramenta para evitar lascamentos e quebras e obter o melhor resultado. Geralmente, é preciso evitar os cortes interrompidos tomando o cuidado de suavizar a entrada da ferramenta no primeiro contato com o material a ser usinado. As ferramentas cerâmicas devem ter um chanfro na aresta, cuja dimensão varia entre 0,05 a 0,3mm com ângulos entre 20 e 30°, ângulos de chanfro maiores aumentam os esforços de corte (GEVORKYAN *et al.*, 2020). A utilização de fluídos de corte precisa ser evitado e, se for necessário, é preciso usá-lo em abundância na aresta de corte, não utilizar uma aresta cortante afiada sem arredondamento

ou chanfro, utilizar arestas com raio de ponta, dentre outros fatores preferíveis (RIBEIRO, 2020).

Diversas falhas prematuras das ferramentas de corte por fratura são geradas por montagens não rígidas da máquina-ferramenta, que submetem as ferramentas a choque mecânico. Quando usadas adequadamente, as ferramentas de corte de cerâmica podem ser utilizadas para um bom acabamento superficial. Ademais, não são direcionadas para operações de corte interrompido pesado, devido à baixa tenacidade (GROOVER, 2012).

A geometria da ferramenta contribui com a melhoria do processamento de torneamento e assim, estudos investigam a contribuição da geometria da aresta da CBN em relação a deformação e temperatura a partir de uma simulação do elemento finito em torneamento duro, além da correlação entre força de corte, desgaste e vida da ferramenta (CAMPOS *et al.*, 2012). O torneamento é feito com materiais de ferramenta de cerâmica mista e CBN, induzindo um ganho relevante, como: tempo de corte menor, baixa rugosidade da superfície da peça, flexibilidade do processo e precisão dimensional (CAMPOS *et al.*, 2015).

2.5.1 Cerâmicas a base Óxido de Alumínio

A ferramentas a base de Alumina ou óxido de alumínio (Al_2O_3) vem sendo utilizadas como ferramentas de corte a mais de 30 anos. São disponibilizadas comercialmente e utilizadas principalmente na usinagem de ferros fundidos e aços endurecidos. Possuem granulação fina (inferior a $5\mu m$) contendo menos de 2% de porosidade. São fabricadas a partir de prensagem e sinterização a frio onde apresentam cor branca e prensagem a quente onde apresentam com cinza (TRENT e WRIGHT, 2000).

O óxido de alumínio assegura a estabilidade térmica para altas temperaturas, por conta de ter baixa condutividade térmica e alta dureza a quente. Além disso, possui alta resistência ao desgaste por abrasão, alta estabilidade química com ferro e alta resistência à oxidação (BORGES, 2020).

As cerâmicas puras podem ser constituídas somente de óxidos podendo ser alumina totalmente pura. Podem conter também algum teor de óxido de magnésio (MgO) para inibir o crescimento de grão, óxido de cromo, titânio e níquel para aumentar a resistência mecânica, ou alumina com baixos percentuais de óxido de zircônio (ZrO_2), que aumenta a tenacidade do material (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013). No Quadro 1 pode-se comparar as propriedades mecânicas das ferramentas cerâmicas a base de alumina onde é possível analisar as mudanças de propriedades quando se adiciona outro material.

Quadro 1 - Propriedades das principais ferramentas cerâmicas a base de Al₂O₃

Material	Módulo de elasticidade (GPa)	Dureza (GPa)	Tenacidade (MPa m ^{1/2})	Coefficiente de dilatação térmica (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Condutividade térmica (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
Al ₂ O ₃	400	17,2	4,3	8,0	10,5
Al ₂ O ₃ + TiC	420	20,6	4,5	8,5	13,0
Al ₂ O ₃ +ZrO ₂	390	16,5	6,5	8,5	8,0

Fonte: Adaptado Machado et al. (2009).

O óxido de magnésio (MgO) utilizado como dopante, possui a finalidade de prevenir o crescimento descontínuo dos grãos e possibilita que o óxido de alumínio seja sinterizado até próximo a densidade teórica. A vantagem benéfica do óxido de magnésio na sinterização da alumina, em menores teores aumenta a taxa de sinterização, por conta da formação da solução sólida pelo aumento da concentração, pois os coeficientes de autodifusão são proporcionais à concentração e mobilidade dos contornos dos grãos de alumina sinterizada, porém é necessário ressaltar que não inibe o desenvolvimento dos grãos e sim o seu crescimento descontínuo (FRANÇA, 2020). O magnésio é leve em relação aos outros metais estruturais, especialmente, devido à resistência-peso que é uma vantagem em componentes de aeronaves e mísseis. (SANTOS, 2021).

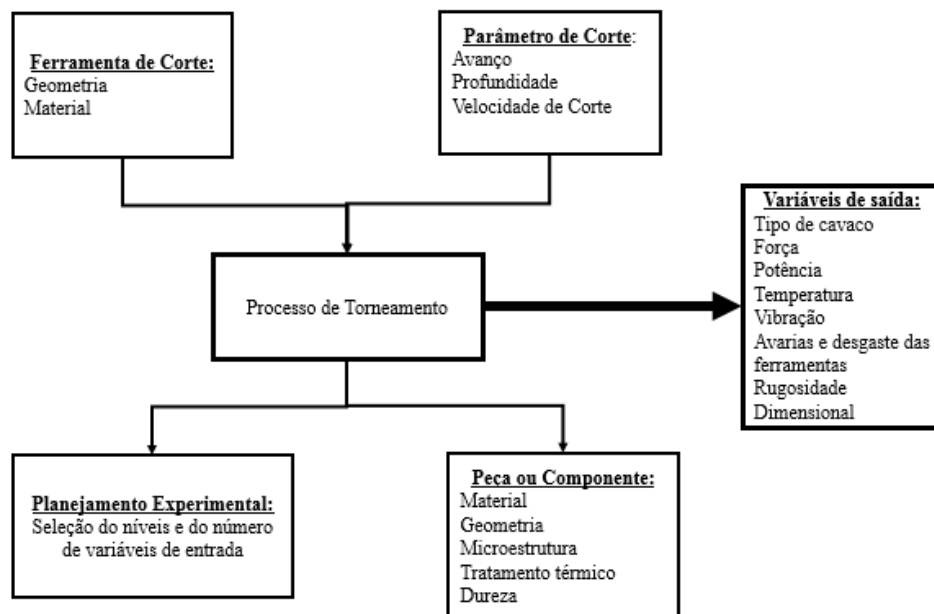
O óxido de cromo aprimora a dureza, resistência a tração, dureza a quente e resistência ao desgaste e tenacidade, portanto é um dos elementos de liga mais efetivos na temperabilidade, já em quantidades maiores aumenta a resistência à corrosão (GROOVER, 2012). Na sinterização da alumina, adição de pequenos teores de óxido de cromo, eleva a taxa de sinterização por conta da geração da solução sólida substitucional. Gerando uma transformação na cor da cerâmica que passa de branca para vermelha, aumenta a resistência mecânica e densificação devido aos coeficientes de autodifusão (FRANCA, 2020).

Esses materiais dopados em função de apresentar ótimas propriedades como dureza a quente possibilitam-se usinar em altas velocidades de corte, porém, em função da baixa condutividade térmica o que dificulta a transferência de calor atingindo altas temperaturas na região próxima ao contato cavaco-ferramenta, a baixa tenacidade pode propiciar trincas e quebra abrupta das ferramentas (TRENT e WRIGHT, 2000).

2.6 VARIÁVEIS DE SAÍDA

Segundo Sousa (2020), as variáveis de entrada e saída do processo fazem parte do processo de usinagem. Algumas destas podem-se intervir diante da mudança de parâmetros e são reconhecidas como variáveis de entrada. Essas variáveis são influenciadas diretamente pela definição dos parâmetros de entrada, porém, as variáveis que não se podem intervir (variáveis de saída) já sofrem influência nas variáveis de entrada. A Figura 7 abaixo, resume as relações entrada/saída associadas com o processo de torneamento.

Figura 7- Resumo da relação entrada/saída no processo de torneamento.



Fonte: Autor

Uma maneira de controlar o processo de usinagem é atuar diretamente nas variáveis de entrada (independentes) e mensurar seu efeito através da medida de variáveis dependentes de saída.

As condições ideais para um determinado processo de usinagem podem ser determinadas com um melhor aproveitamento da ferramenta de corte e uma melhor taxa de remoção de material. Desta forma, a pessoa responsável pelo controle da produção trabalha na supervisão destas variáveis, usualmente indiretas.

2.6.1 Rugosidade

A rugosidade é composta de irregularidades finas ou de erros micro geométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta etc.). É um parâmetro utilizado como saída para controlar um processo de usinagem. (MACHADO *et al.*, 2009).

Na usinagem convencional, o termo integridade da superfície é usado para definir as condições de uma superfície usinada e descrever a qualidade. A integridade superficial na usinagem é resultado da reunião de diversos processos de deformação plástica e propagação de trincas ao longo da usinagem. A rugosidade é mensurada por meio de parâmetros que revelam o acabamento (PASCHOALINOTO *et al.*, 2012). A rugosidade são várias irregularidades, portanto pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam o acabamento superficial. Na usinagem, a escolha dos parâmetros de corte adequados é importante no controle da rugosidade (GABALDO, 2019).

Há inúmeros fatores que influenciam na rugosidade das superfícies usinadas pelo processo de torneamento: profundidade de usinagem, velocidade de corte (V_c), velocidade de avanço (V_f) e geometria ferramental (BELINATO *et al.*, 2017).

A rugosidade, conforme os estudos de Borges (2020), influencia não somente na precisão dimensional das peças usinadas, bem como nas propriedades, sendo um parâmetro de avaliação do desempenho das ferramentas de corte. Portanto, para Yildirim *et al.* (2020), a rugosidade de superfícies sólidas é relevante para a interação da superfície, já que os aspectos superficiais pressionam a área de contato real, desgaste, fricção, entre outros.

O desempenho da ferramenta de corte é um dos pontos decisivos que influenciam na qualidade da superfície, na eficiência do processamento, no custo e na precisão e os desafios surgem pelo desgaste excessivo da ferramenta, rugosidade da superfície, integridade superficial deficiente a aumento da temperatura de corte (LI; LI, 2017).

A rugosidade muitas vezes pode ser influenciada pelo raio da ponta da ferramenta que pode vir acompanhada pelo seu desgaste, pois diante dos resultados de estudos demonstraram que um raio grande pode obter um acabamento superficial mais fino, porém o desgaste tende a crescer (SHABANI *et al.*, 2021).

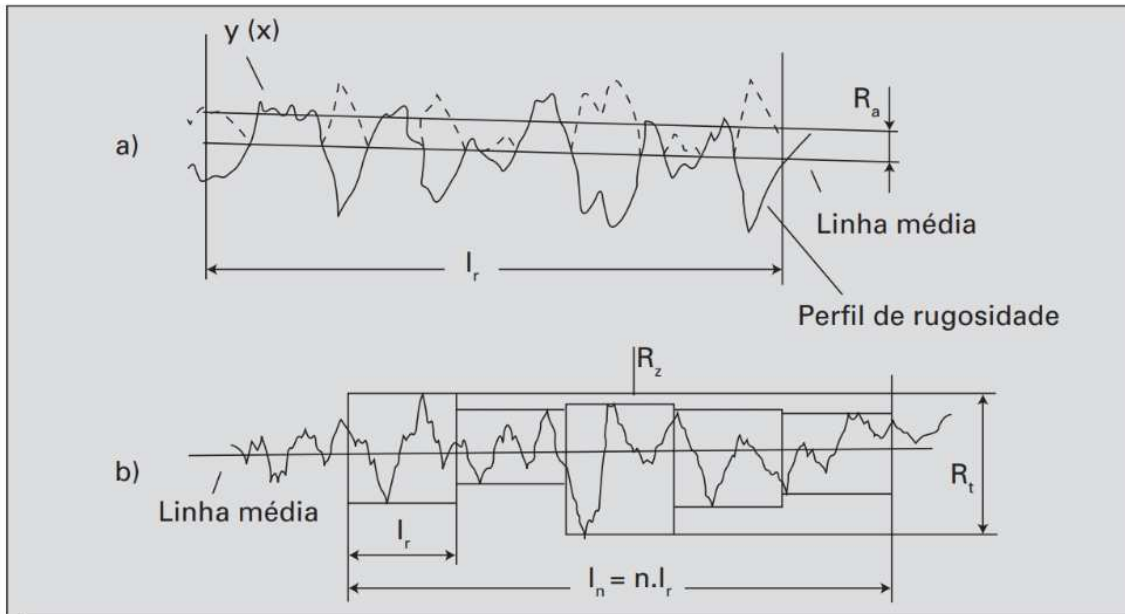
A rugosidade é avaliada após o processo de usinagem como parâmetro micro geométrico, de várias formas e as mais usuais são rugosidade R_a , R_t e R_z (μm).

Segundo Machado *et al.*, (2015), a rugosidade média R_a é o desvio aritmético médio dos valores absolutos das ordenadas no comprimento da amostragem.

Rugosidade R_t é altura total do perfil calculada pela soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento da avaliação.

Já a Rugosidade R_z é a altura máxima do perfil considerando os picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem. Na Figura 8 estão representadas as rugosidades R_a , R_t e R_z .

Figura 8- Representação gráfica de rugosidade: a) R_a e b) R_t e R_z



Fonte: Machado et al. (2015)

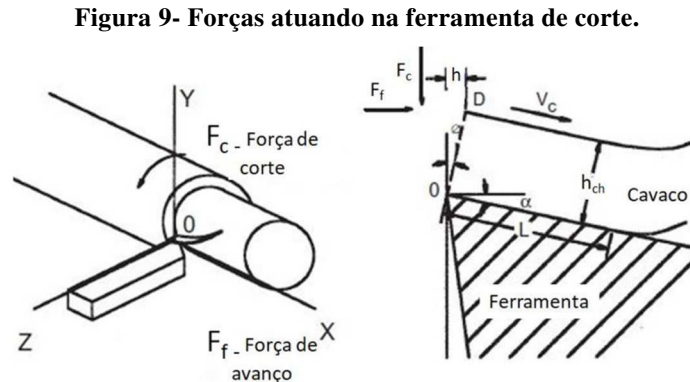
2.6.2 Potência de corte

De acordo com Trent e Wright (2000), é muito importante conhecer as forças que atuam no processo de usinagem, ainda mais quando se está envolvido na fabricação de máquinas ferramentas, onde se faz necessário conhecer as forças para que se possa projetar os elementos de fixação, os porta ferramentas com rigidez e livre de vibrações que podem vir a prejudicar o processo de usinagem. Essas forças variam de acordo com a geometria da ferramenta e conhecendo as forças e realizando a medições de forma precisa é possível melhorar o design das ferramentas de corte.

Ainda segundo Trent e Wright (2000), para uma operação de torneamento, as componentes de forças são relativamente simples e podem ser medidos em três direções conforme descritas abaixo:

- a) A força de corte (F_c): É a componente da força que atua na face da ferramenta e normal para face de corte e na direção Y_0 . É geralmente a maior das três componentes de força e atua na direção da velocidade de corte (V_c).
- b) Força de avanço (F_f): pode também ser nomeada por algumas literaturas com F_t é a componente da força que atua na ferramenta na direção OX paralela com a direção de avanço. Essa componente também atua tangencialmente as forças de corte principal (F_c).
- c) Força de profundidade (F_p): É considerada a menor das três componentes envolvidas e age na direção OZ de forma perpendicular ao plano de trabalho. Essa componente tende a empurrar a ferramenta para fora da área de trabalho na direção radial. Em alguns casos por a menos das forças tende a ser ignorada.

Na Figura 9 abaixo, pôde-se observar as três componentes, força de corte na direção YO , força de avanço na direção OX e força de profundidade na direção OZ .



Fonte: Adaptado de Trent e Wright (2000).

Uma máquina ferramenta consome potência para girar seu eixo árvore para executar os movimentos de corte e para promover o movimento de avanço. Assim é possível estabelecer as seguintes relações para potência de corte. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Sendo representada pela Equação 2.

$$P_c = \frac{F_c \times V_c}{60 \times 10^3} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

P_c = Potência de corte (KW)

F_c = Força (N)

V_c = Velocidade de corte (m/min .)

2.6.3 Vibração

Na usinagem, acontece deformações plásticas e atritos entre o cavaco, e a ferramenta de corte com a peça gerando vibrações por conta do tempo de corte desgastando a ferramenta, sendo a vibração considerada um movimento ondulatório que se propaga por materiais variando com o tempo. As vibrações num sistema podem ser definidas por meio dos materiais variando com o tempo e podem ser consideradas como forças livres, já as vibrações auto excitadas vinculadas aos processos de manufatura como a retificação, fresamento e torneamento. O termo “auto excitada” se deve ao movimento de atuação da ferramenta de corte sobre a peça na usinagem (SOUSA, 2020).

Segundo estudos de Ribeiro (2020), a vibração na usinagem acontece pela dinâmica do processo de corte estar em ressonância à estrutura ao seu redor. Caso o amortecimento seja insuficiente, efeitos indesejados podem ser gerados, como ondulações na superfície da peça usinada e aumento do desgaste da ferramenta. Em contrapartida as condições estáveis desse processo, um sistema dinâmico desta magnitude gera movimentos que ultrapassam os esperados, com base nos valores nominais de forças de corte. A ferramenta de corte e a peça que está passando pela usinagem podem sofrer vibrações geradas pela variação das forças de contato entre os componentes desse sistema, justificada pela variação da resistência ao corte ou pelos parâmetros de corte.

A vibração nas máquinas ao longo do torneamento é um exemplo de oscilação vinculada a flexibilidade da máquina, ferramenta de corte e peça de trabalho. Sua avaliação é essencial para analisar precisamente o processo e evitar vibrações durante o processo de corte (STEPAN *et al.*, 2017). Durante a usinagem a vibração acontece pela rigidez máquina, suporte de ferramenta de corte e pela fixação da peça de trabalho não ter o amortecimento adequada. São fatores que podem gerar interferência na rugosidade, problemas na precisão das medidas, desgaste prematuro e ruídos indesejáveis. Para medir as vibrações utiliza-se transdutores piezelétricos do tipo acelerômetro, com saída em volts, em especial quando a aquisição de sinais tem frequência de 1 a 20 kHz (FRANÇA, 2020).

2.6.4 Emissão acústica

Nos anos 50 na Alemanha descobriu-se a técnica de emissão acústica para monitorar o processo e fabricação. As pesquisas consideram o uso da emissão acústica no monitoramento das condições de máquinas-ferramenta e análise processual. O primeiro passo para os estudos da emissão acústica foram os problemas para detectar o desgaste e fratura das ferramentas (SOUSA, 2020). É atribuída a fontes como deformações plásticas e elásticas, tanto da peça quanto da ferramenta de corte, atrito, fratura da peça, desgaste e quebra da ferramenta expõe a emissão acústica como ondas de tensão elástica, por conta da liberação energética na deformação de um material sujeito a um esforço externo (RIBEIRO, 2020).

Conforme os estudos de França (2020), a emissão acústica é definida como ondas de tensão elástica com alta amplitude e baixa frequência, geradas por atuações dinâmicas sobre os materiais, quando expostos a estímulos. Quando a usinagem na criação do cavaco acontece, analisa-se que há um atrito entre ferramenta e peça ou pelo contato delimita que haja uma formação. Além disso, podem compor uma quantidade de energia suficiente para criar ondas de tensão que geram movimentos sobre a superfície, que atenuam da superfície para o centro do material. Para Ribeiro (2020), a emissão acústica é importante no monitoramento da usinagem que são os limites de frequência que definem o fenômeno, que embora não haja um consenso, está numa variação entre 15 a 1200 kHz, diante disso as frequências altas tornam o sinal insensível aos ruídos das máquinas ferramentas.

2.6.5 Desgaste e avarias da ferramenta

As variáveis como o desgaste da ferramenta de corte também acarretam em mudanças nos resultados principais. Existem estudos que utilizam do desgaste da ferramenta de corte para analisar a influência nas respostas do processo (EVANGELISTA *et al.*, 2018). O desgaste mais recorrente é o desgaste de flanco, por conta de a usinagem permitir o desgaste frontal, gerando deterioração da parte superficial da peça e mudança na aresta de corte, em geral, gerado pelo aumento da velocidade de corte (V_c), conforme a Figura 10. A utilização da ferramenta de corte com ângulo de saída positivo proporciona uma redução de pressão sobre a ferramenta minimizando o contato entre ferramenta e cavaco (SOUSA, 2020).

Figura 10- Desgastes nas ferramentas de corte.



Fonte: Adaptado Sandvik (2019).

O desgaste das ferramentas é lento em relação as ferramentas de metal duro. As taxas de desgaste menores e maior remoção de material é basicamente um aumento na eficiência produtiva (REDDY; SNG, 2019). Há três tipos de desgastes, segundo Borges (2020):

- a) Desgaste de flanco: é o mais comum e acontece nas superfícies de folga da ferramenta. É dada pela abrasão gerada pelos componentes duros no material da peça, incentivado pelo crescimento na velocidade de corte (V_c). Esse mecanismo de desgaste limita a ferramenta de corte, gerando a perda de material cortante e, portanto, é tido como fim de vida (BORGES, 2020).
- b) Desgaste de cratera: acontece na superfície de saída da ferramenta, onde está a zona de deslizamento do cavaco ao longo do corte. É gerada pela reunião dos mecanismos de desgaste por difusão ou abrasão (BORGES, 2020). Não é tão comum em alguns processos de usinagem, especialmente quando se usam ferramentas de metal duro com cobertura, ferramentas cerâmicas e quando o material é frágil (GAMA, 2014).
- c) Desgaste de entalhe: é o dano excessivo que fica na face e flanco da ferramenta, na linha de profundidade de corte, gerado pela adesão do material e deformação na superfície. Comum em aços inoxidáveis (BORGES, 2020).

O desgaste da ferramenta de corte ocasionada na usinagem são as principais dificuldades industriais. Em resposta à necessidade da indústria de manufatura e usinagem, a quantidade de pesquisadores realizou a análise do desgaste da ferramenta. Os materiais duros são tidos como uma faixa de dureza entre a 70 HRC (PANDA *et al.*, 2018).

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) desgastes são causados pelo perca contínua de partículas de ferramenta devido a ação do corte as demais ocorrências na resta de corte da ferramenta são denominadas de avarias e diversos são os tipos de avarias que podem acontecer em uma ferramenta de usinagem.

- a) Deformação plástica: são deformações formadas na aresta de corte da ferramenta e são formadas por altas pressões e temperaturas na superfície de corte. Essa avaria prejudica a formação do cavaco e o controle dimensional da peça usinada;

- b) Lascamento: é a remoção de partículas maiores da superfície da ferramenta e ocorrem principalmente ferramentas de materiais frágeis ou arestas de corte pouco reforçadas;
- c) Trinca: as trincas são avarias provocadas pela variação de temperatura ou grandes esforços mecânicos e podem ter origem térmica quando se tem variação de temperatura e as trincas ocorrem perpendicular a aresta de corte ou podem ser de origem mecânica onde as trincas são paralelas a aresta de corte;
- d) Quebra: é quando algum desgaste ocorre de forma mais acentuada e pode levar a quebra da ferramenta e ocorrem em ferramentas mais duras que sofrem cargas excessivas durante a usinagem. Essas quebras podem ocorrer em casos de cotes interrompidos ou paradas bruscas de usinagem;

As análises dos tipos de avaria como é feito nos desgastes são feitas através de microscópio determinando os tipos conforme é apresentado na Figura 11.

Figura 11- Avarias nas ferramentas de corte.



Fonte: Adaptado Sandvik (2022).

As ferramentas cerâmicas possuem uma utilização reduzida por se apresentar frágil e suscetível a falhas. O esperado e o ideal é que a cerâmica se desgaste mecanicamente ou quimicamente, visto que as avarias se desenvolvem rapidamente e inutiliza o inserto. (RIBEIRO; MALÈRE; RIBEIRO, 2007). A capacidade de corte a elevadas velocidades das ferramentas à base de alumina, comparadas com as ferramentas convencionais, é provavelmente devido a duas propriedades da alumina, sendo a primeira a manutenção de sua elevada resistência a altas temperaturas, e a segunda, alta resistência à reação com aços. (TRENT, 2000).

Um estudo por Aslantas, Uzun e Çicek (2011), revelou que ao usinar aço AISI 52100 endurecido com insertos de cerâmica mista na matriz Al_2O_3 -TiCN com e sem revestimento de

TiN revelou que neste caso o tipo de desgaste predominante foi desgaste de cratera para ambos insertos.

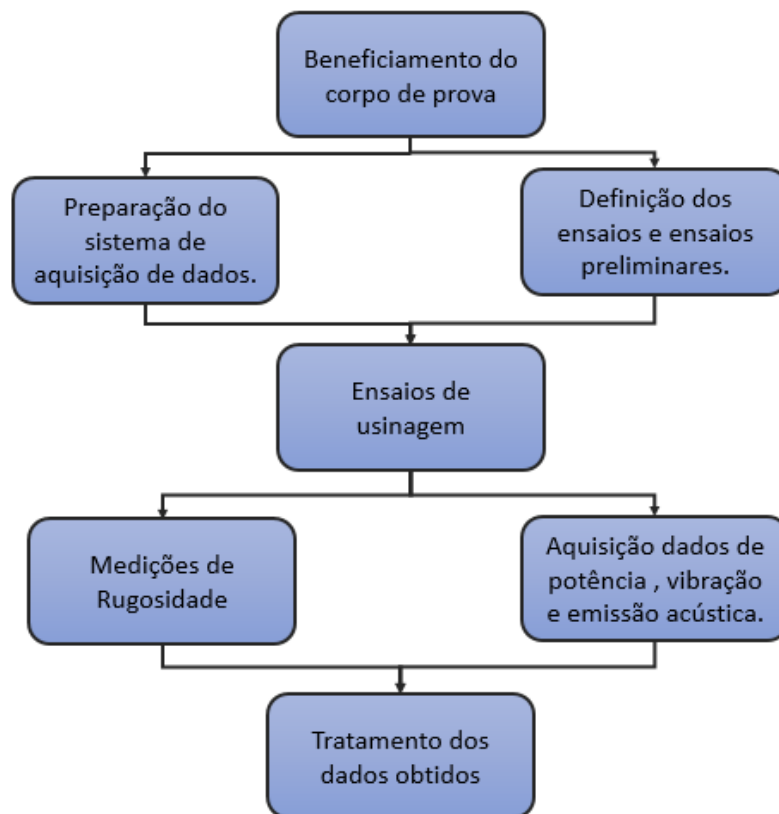
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DEFINIÇÃO DO MÉTODO DE PESQUISA

O material selecionado para pesquisa corresponde ao um aço ABT 52100 que possui uma alta temperabilidade, resistência ao desgaste e dureza podendo ser usado em esferas, roletes e pistas de rolamento, anéis de rolamento, entre outras. É um aço construtivo de alto teor de carbono, ligado ao cromo, usado para beneficiamento quando se busca obter a alta dureza.

O estudo foi realizado utilizando um corpo de prova cilíndrico e os resultados foram coletados durante os ensaios de torneamento. O fluxo de atividades foram subdividas conforme fluxo de processos mostrado na Figura 12.

Figura 12- Fluxograma de atividades desenvolvidas



Fonte: Autor

3.2 MATERIAIS PARA O ESTUDO

3.2.1 Beneficiamento do Corpo de Prova

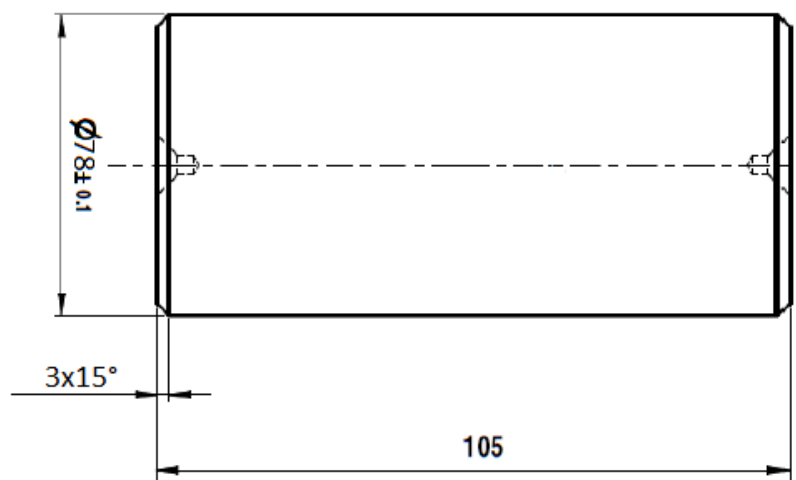
Para esse estudo, foi utilizado como corpo de prova uma barra cilíndrica de AÇO ABNT 52100. Suas dimensões iniciais eram de $\text{Ø}80\text{mm} \times 100\text{mm}$ de comprimento. O material foi doado pela empresa GGD Metals e sua composição química pode ser observada na Tabela 2 e após tratamento térmico apresentou dureza de 68HRC e foi previamente preparado para início dos ensaios com a dimensão de $\text{Ø}78\text{mm} \times 100\text{mm}$ de comprimento conforme mostrado na Figura 13.

Tabela 2 - Composição química do AÇO ABNT 52100 utilizado.

Material	Elementos	%
ABNT 52100	C	1,02
	Mn	0,38
	Si	0,24
	Cr	1,40
	Ni	0,07
	Mo	0,02
	Cu	0,12
	Sn	0,024
	p	0,039

Fonte: adaptado GGD Metals

Figura 13- Desenho do corpo de prova (unidades em mm).



Fonte: Autor

3.2.2 Equipamentos para Ensaios de Torneamento e Aquisição de Dados

Os ensaios de torneamento foram desenvolvidos integralmente no Laboratório de Estudo de Usinagem na Unesp-Guaratinguetá, utilizando Centro de Torneamento CNC Romi modelo GL 240M com 15kW de potência. Figura 14.

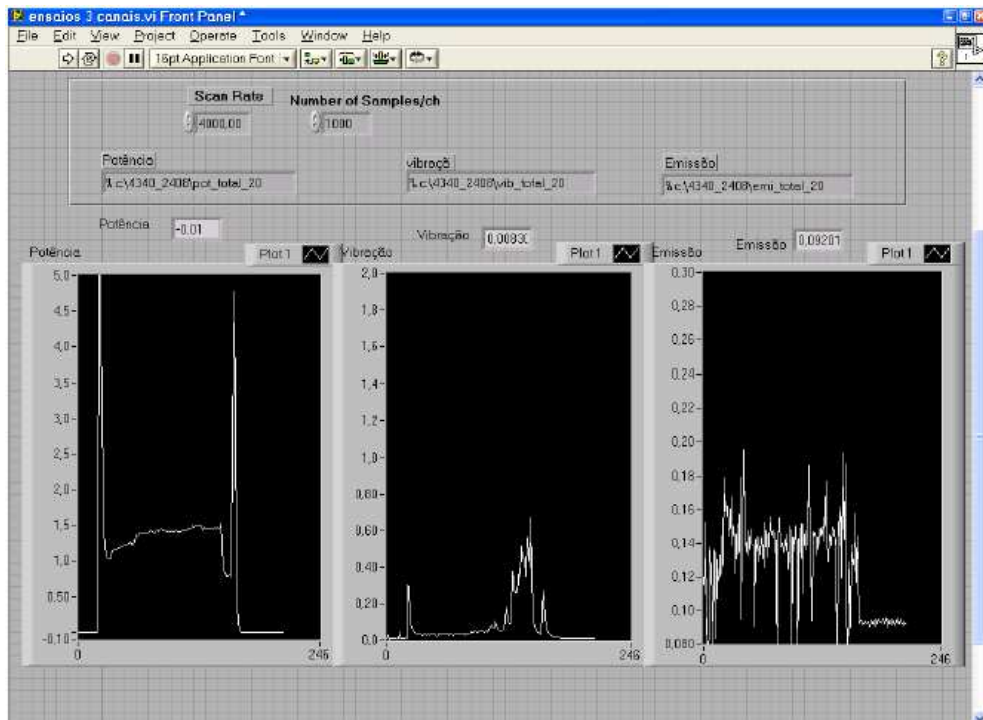
Figura 14- Torno CNC modelo GL 240M



Fonte: autor

Para aquisição de dados, foi instalado um sistema para coleta em tempo real dos sinais de potência e corte, emissão acústica e vibração. O sistema é composto de um módulo de canais da marca National Instruments modelo BNC-2120, acoplado a uma placa de aquisição de dados também da mesma marca ligada a um computador. Para a captação dos dados recebidos pela placa de aquisição de dados foi utilizado um programa supervisor desenvolvido no software LABVIEW da National Instruments onde é possível receber e analisar em tempo real os dados obtidos e gravá-los para tratamento dos resultados. Na Figura 15 é possível observar a tela com os dados captados durante os ensaios.

Figura 15 - Tela do programa para captação de sinais durante os ensaios.



Fonte: Autor

Para a aquisição da potência consumida do motor do centro de usinagem foram usados sensores de efeito Hall marca LEM modelo AT 100 B10 podendo ser observado na Figura 16. O sinal do sensor (Potência) foi captado por uma placa de aquisição de dados e armazenado durante a execução dos ensaios.

Figura 16 - Ligação do sensor de potência acoplado na entrada do motor de rotação do centro de torneamento CNC.

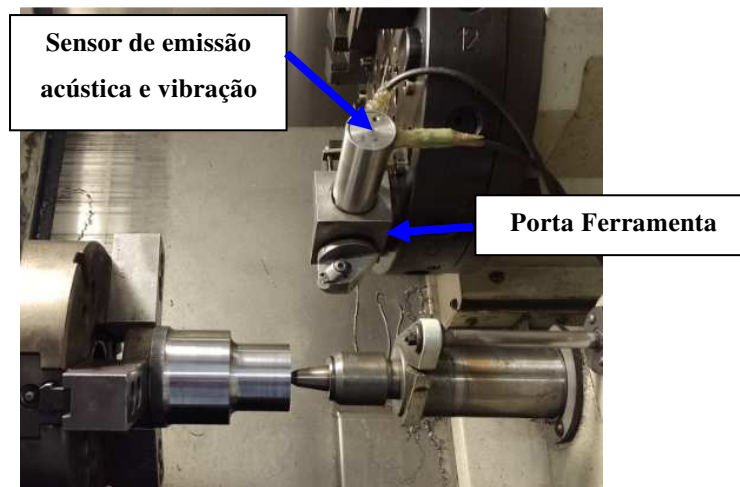


Fonte: Autor

A emissão Acústica foi obtida por um módulo de emissão acústica composto por um sensor de emissão acústica (piezoelétrico) e um amplificador de sinal com saída retificada em RMS (Root Mean Square), marca PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, modelo do sensor R15A, modelo do amplificador de sinal 1272-1000.

Os dados de vibração foram obtidos através do sensor de vibração da marca Vibro Control e modelo TV-100. Os sensores foram posicionados com o porta-ferramenta. Figura 17.

Figura 17 – Sensores para coleta dos dados de vibração e emissão acústica fixados no porta ferramentas.



Fonte: Autor

3.2.3 Medição de Rugosidade

As rugosidades R_a e R_t e R_z foram obtidas nas peças depois de cada ensaio, com o auxílio do rugosímetro portátil da MAHR modelo MarSurf M300 + RD18 com cut-off de 0,8 e comprimento de amostragem de 4 mm. Na Figura 18 é apresentado imagem do aparelho utilizado para medição da rugosidade.

Figura 18– Rugosímetro portátil da MAHR modelo MarSurf M300 + RD18



Fonte: Autor

3.2.4 Ensaios de Usinagem

Com o objetivo de analisar a usinabilidade do aço ABNT 52100 endurecido no processo de torneamento e a viabilidade das ferramentas cerâmicas experimentais de $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Cr}_2\text{O}_3$ e $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$, foi verificado o comportamento das variáveis de saída do processo como rugosidade, desgaste, avarias e vida da ferramenta, potência de usinagem, vibração, emissão acústica, tipo e formas de cavaco.

Utilizando um arranjo fatorial completo foi definido que seriam utilizadas duas velocidades de corte V_c (120 e 160 m/min.), três profundidades de usinagem a_p (0,75; 1,0 e 1,25 mm) e duas ferramentas cerâmicas realizando duas repetições para cada condição totalizando 24 ensaios conforme Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Combinação experimental para os testes com as ferramentas de cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Cr}_2\text{O}_3$ e $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$

Ferramenta	Experimento	Velocidade de corte (m/min)	Avanço(mm/rot.)	Profundidade de usinagem (mm)
$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Cr}_2\text{O}_3$	1 e 2	120	0,05	0,75
	3 e 4	120	0,05	1,00
	5 e 6	120	0,05	1,25
	7 e 8	160	0,05	0,75
	9 e 10	160	0,05	1,00
	11 e 12	160	0,05	1,25
$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$	13 e 14	120	0,05	0,75
	15 e 16	120	0,05	1,00
	17 e 18	120	0,05	1,25
	19 e 20	160	0,05	0,75
	21 e 22	160	0,05	1,00
	23 e 24	160	0,05	1,25

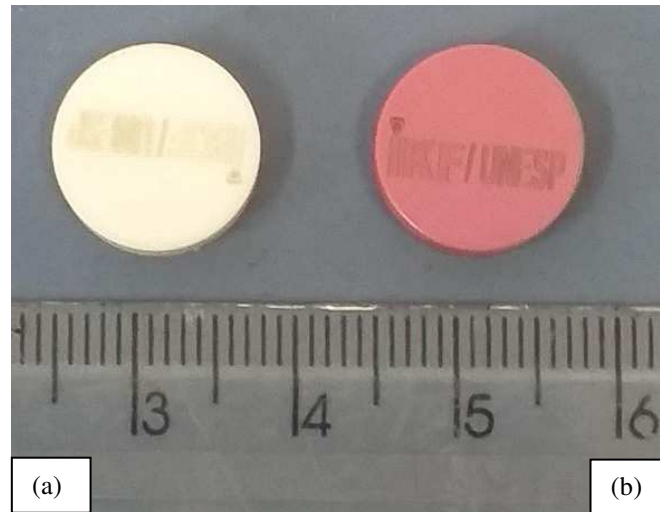
Fonte: Autor

Cada combinação foi realizada com uma aresta de corte nova da ferramenta e o percurso de avanço adotado foi de $L_f = 40\text{mm}$. Além das variáveis de saída coletadas pelos aparelhos foram realizadas três medições de rugosidade para R_a , R_t e R_z em posições diferentes do corpo de prova.

As pastilhas utilizadas foram cerâmicas experimentais, desenvolvidas na UNESP em escala laboratorial no Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia e Ciências, campus de Guaratinguetá, da UNESP em parceria com DCTA - Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial, em São José dos Campos.

As ferramentas possuem geometria do tipo RNGN 120400-T0,20-20 de 12,7 mm de diâmetro com 4,76mm de largura, de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ dopada com cromo (ferramenta na cor Rosa) e $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ dopada com magnésio (ferramenta na cor Branca) como visto na Figura 19.

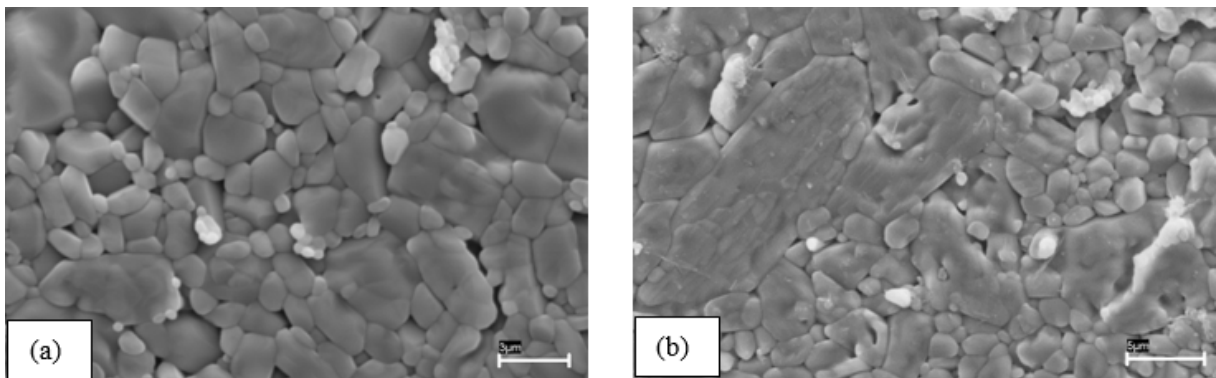
Figura 19– Pastilhas experimentais RNGN120400 de (a) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ e (b) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$.



Fonte: Autor

A ferramenta cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ utilizada para este estudo possui como composição 99,00% de Al_2O_3 e 1,00% de Cr_2O_3 e a ferramenta de e $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ é composta por 99,75% de Al_2O_3 e 0,25% de MgO . Na Figura 20 estão apresentadas as micrografias das ferramentas.

Figura 20-Micrografia das ferramentas cerâmicas (a) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ e (b) $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$.



Fonte: Autor

No Quadro 2 são apresentadas as propriedades de cada ferramenta cerâmica utilizada.

Quadro 2 - Densidade, Dureza, Retração Linear e Tenacidade para os materiais das ferramentas.

	Densidade Relativa (%)	Dureza Vickers	Retração Linear (%)	Tenacidade a Fratura (Mpa.m^{1/2})
Al ₂ O ₃ -Cr ₂ O ₃	98,15	2148±0,08%	19,8±0,15%	3,25± 0,22%
Al ₂ O ₃ -MgO	98,5±0,11%	1928,35± 0,12%	20,41± 0,16%	3,646± 0,14%

Fonte: Autor

3.2.5 Tratamento dos dados Obtidos

Os dados coletados durante os ensaios foram armazenados com auxílio do software LABVIEW e tratados posteriormente com auxílio dos softwares MATLAB- RB2015b utilizando três programas desenvolvidos pelo grupo de pesquisa na UNESP Guaratinguetá. Kondo (2019) descreve as etapas de tratamento no MATLAB, como:

- O primeiro programa utilizado fez a substituição das vírgulas geradas pelo software LABVIEW por pontos para que os dados possam ser utilizados no software MATLAB- RB2015b;
- Segundo programa foi utilizado afim de transformar os dados brutos dos sensores em dados das variáveis de resposta reduzindo os dados para valores médios por segundo de ensaio realizando a conversão da matriz de dados em um vetor de dados buscando facilitar a programação e operações com números.
- O último programa realiza a transformação dos sinais de grandezas requeridas transformando sinais de tensão U_{cc} para potência, emissão acústica e vibração para sinais nas unidades Watts (potência), V_{RMS} (emissão acústica) e mm/s (vibração). Essa transformação, é realizada utilizando equações fornecidas pelos próprios fabricantes dos sensores conforme são apresentadas nas equações (3), (4) e (5).

$$P = U_{cc} \cdot 10 \cdot 220 \cdot 0,79 \cdot \sqrt{3} \quad \text{Eq. 3}$$

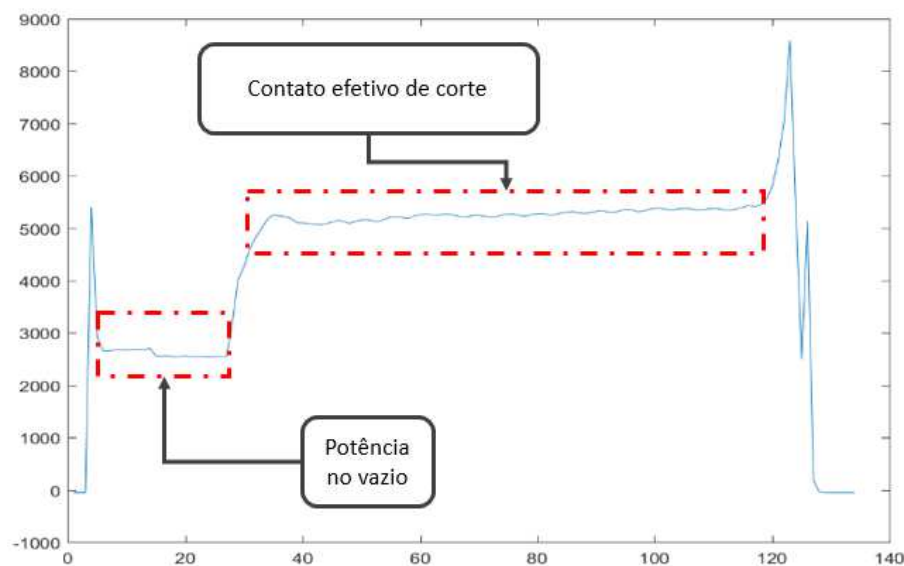
$$E_{RMS} = U_{cc} \quad \text{Eq. 4}$$

$$Vib = U_{cc} \cdot 258 \quad \text{Eq. 5}$$

A separação dos dados foi feita identificando no gráfico gerado pelo software LABVIEW o primeiro contato da ferramenta com a peça, descartando a potência em vazio, correspondente a potência consumida para a movimentação dos mecanismos do CNC, atritos e outras perdas e assim identificando e separando os dados de potência, vibração e emissão acústica onde a ferramenta realmente tem contato com a peça. Na Figura 18 abaixo é possível verificar os pontos utilizados.

Após realizado as separações o software gerou os gráficos de potência, vibração e emissão acústica durante o corte efetivo da ferramenta. Na Figura 21 é possível observar a potência no vazio e o efetivo contado da ferramenta com a e peça.

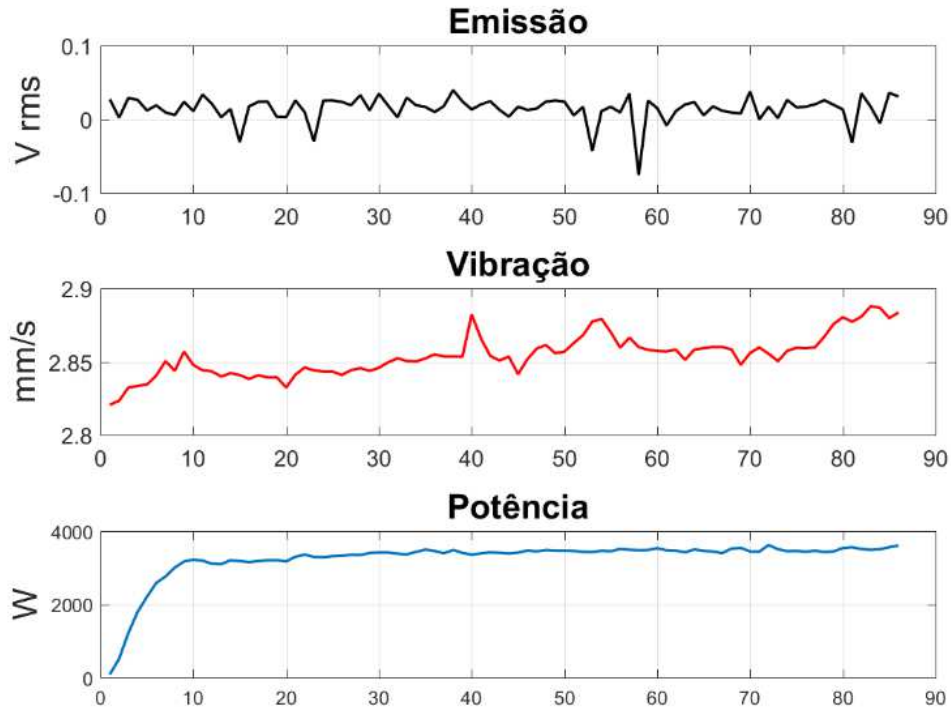
Figura 21– Região identificada no gráfico com a potência no vazio e o contato efetivo de corte



Fonte: Autor

O software gerou também os valores de máximos de emissão acústica, potência e vibração onde foram submetidos a análises estatísticas de variância e teste de TUKEY no software MINITAB 17. Na Figura 22, são mostrados os gráficos de emissão acústica, potência e vibração gerados pelo software MATLAB- RB2015b.

Figura 22– Exemplo do gráfico gerado com as máximas de Emissão acústica, vibração e potência.



Fonte: Autor

3.2.6 Análise de vida e Desgaste das ferramentas

Após testes preliminares de parâmetros de corte, adotou-se a utilização de duas velocidades de corte V_c (120 e 160 m/min.) e três profundidades de corte a_p (0,75; 1,0 e 1,25 mm). Para cada ensaio ($L_f=40$ mm) foi utilizado uma aresta de corte da ferramenta onde o inserto foi avaliado para cada troca de aresta.

O desgaste das arestas de corte utilizadas nos ensaios fora avaliado por um microscópio modelo QS-LBZ -Visual QUICK SCOPE série 359 da marca Mitutoyo apresentado na Figura 23 que possui um sistema de captura de imagens através de software do equipamento onde foi possível capturar imagens e registrar o aspecto do desgaste e avarias. Neste mesmo equipamento foram coletadas imagens dos cavacos, para identificação das formas dos cavacos.

Figura 23– Microscópio marca Mitutoyo modelo QS-LBZ -Visual QUICK SCOPE série 359.



Fonte: Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados mostrando os resultados das análises finais de emissão acústica, vibração, potência e rugosidade além dos resultados das interações entre as variáveis de entrada velocidade de corte (V_c), profundidade de usinagem (a_p) e as ferramentas cerâmicas de $Al_2O_3-Cr_2O_3$ e Al_2O_3-MgO . O teste de Tukey foi realizado quando houve influência significativa ($P < 0,05$) nos resultados de a_p .

4.1 EMISSÃO ACÚSTICA

A importância dos fatores controlados V_c , a_p e ferramenta ou da interação dos mesmos obtida como resposta na emissão Acústica máxima (V_{RMS}) são apresentados na Tabela 4. O fator ou a interação dos fatores com valores de P (pvalue) gerados automaticamente pelo MINITAB inferiores a 0,05 influenciaram significativamente nos resultados.

A interação entre os fatores velocidade de corte e profundidade de usinagem (pvalue=0,01) influenciaram nos resultados de emissão máxima com um grau de contribuição de 37,65% no resultado, porém, a interação entre os fatores ferramenta e a_p com Fvalue próximo de 2 (Fvalue=1,56) indicam uma relevância estatística nos resultados. A variável V_c mesmo com significância na resposta superior a 5% contribuiu com uma relevância estatística pois o valor de Fvalue também se mostrou próximo de 2 (Fvalue=2,21).

Tabela 4 - Análise de variância para Valores de Emissão máxima

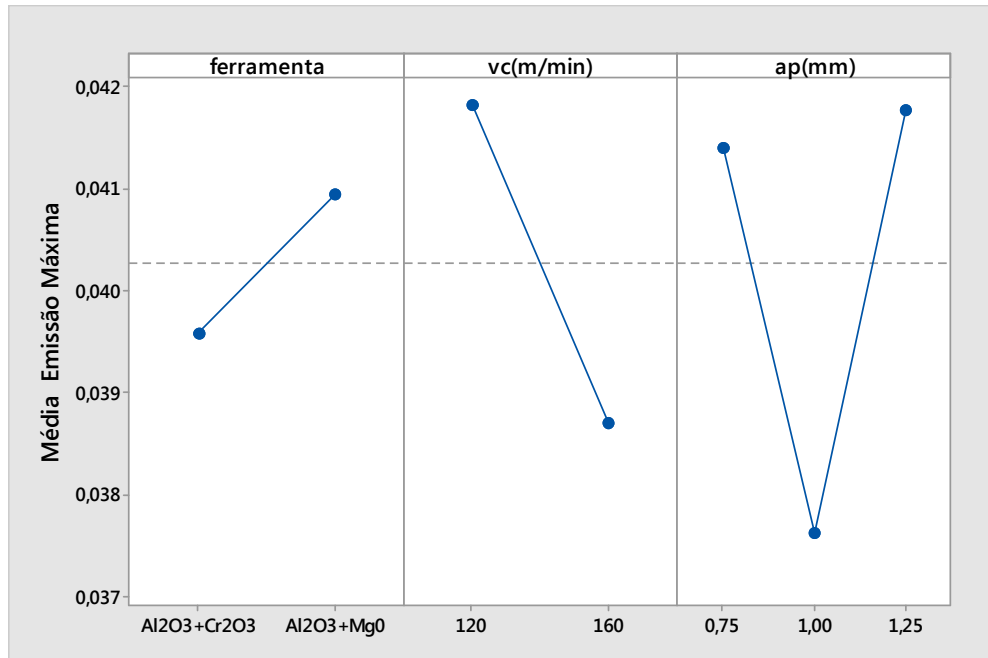
Fonte	GL	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Ferramenta	1	0,000011	0,000011	0,42	0,531	1,13
V_c	1	0,000058	0,000058	2,21	0,163	5,97
a_p	2	0,000084	0,000042	1,60	0,242	8,64
Ferramenta * V_c	1	0,000014	0,000014	0,51	0,488	1,44
Ferramenta * a_p	2	0,000083	0,000041	1,56	0,249	8,53
V_c * a_p	2	0,000366	0,000183	6,94	0,010	37,65
Ferramenta * V_c * a_p	2	0,000039	0,000019	0,73	0,500	4,01
Erro	12	0,000317	0,000026			
Total	23	0,000972				

Fonte: autor

A análise de variância mostrou que a influência dos fatores ferramenta e a_p não contribuiu significativamente nos resultados pois não mostraram respostas diferentes a mudanças dentro do nível de significância de 5%.

Os valores máximos de respostas obtidos para emissão acústica estão apresentados na Figura 24.

Figura 24– Gráfico dos efeitos principais para emissão acústica máxima.

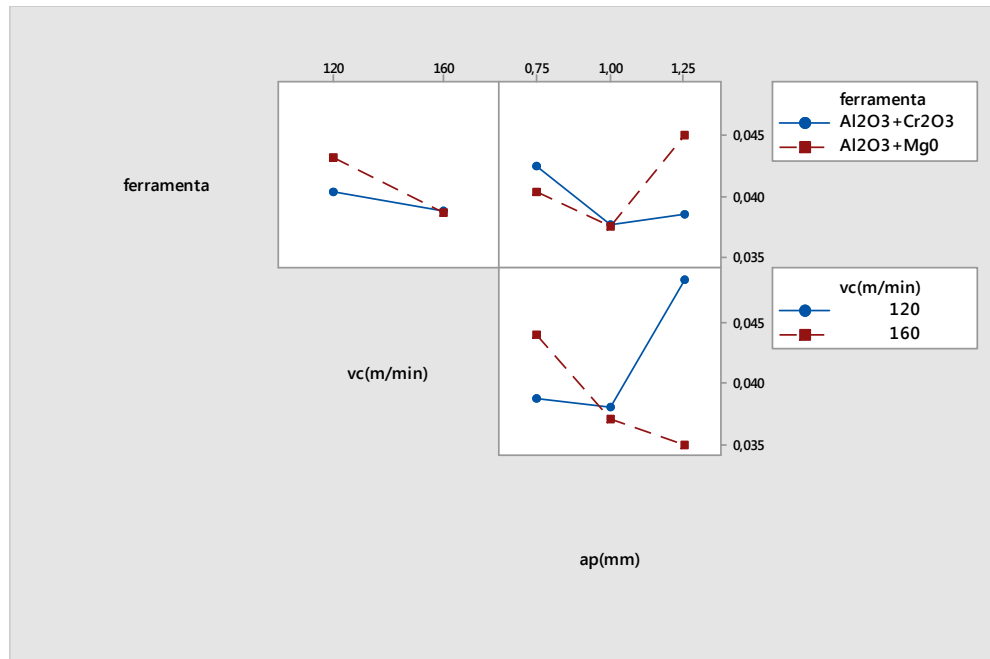


Fonte: autor

As variáveis que apresentaram menores valores de emissão acústica foram as ferramentas Al₂O₃-Cr₂O₃, V_c=160 m/min com a_p=1mm. A diferença do resultado de emissão acústica para o fator velocidade de corte (V_c) mostra que para V_c=120m/min houve um aumento de emissão mostrando maior atrito e energia durante a usinagem.

Na Figura 25 é mostrado os resultados da interação entre ferramenta e a_p onde o valor apresentado pela análise de variância é de Pvalue=0,01 onde houve influência significativa nas respostas.

Figura 25– Gráfico das interações para emissão acústica máxima.



Fonte: autor

O resultado das interações entre V_c e a_p mostram que quanto se usinou com $V_c=120\text{m/min}$ e $a_p=1,25\text{mm}$ houve um aumento dos resultados de emissão acústica máxima.

Para os resultados das interações entre ferramenta e a_p observou-se um aumento da emissão acústica para ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ onde observou-se uma relevância estatística nos resultados. Para esta ferramenta quando se utilizou $V_c=120\text{m/min}$ e $a_p=1,25\text{ mm}$ observou-se um resultado maior para os resultados máximos de emissão acústica se comparado a resposta de emissão acústica para ferramenta de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$.

4.2 VIBRAÇÃO

A importância dos fatores controlados V_c , a_p , ferramenta e da interação dos mesmos obtida como resposta para média de vibração são apresentados na Tabela 5. O fator ou a interação dos fatores com valores de P (pvalue) gerados automaticamente pelo MINITAB inferiores a 0,05 influenciaram significativamente nos resultados.

Os fatores velocidade de corte (V_c) e profundidade de corte (a_p) influenciaram significativamente nos resultados médios de vibração com valores de P de 0,000 e 0,002 respectivamente os valores acima apresentaram um grau de contribuição no resultado de 38,15% para velocidade de corte (V_c) e 26,49% para profundidade de corte (a_p).

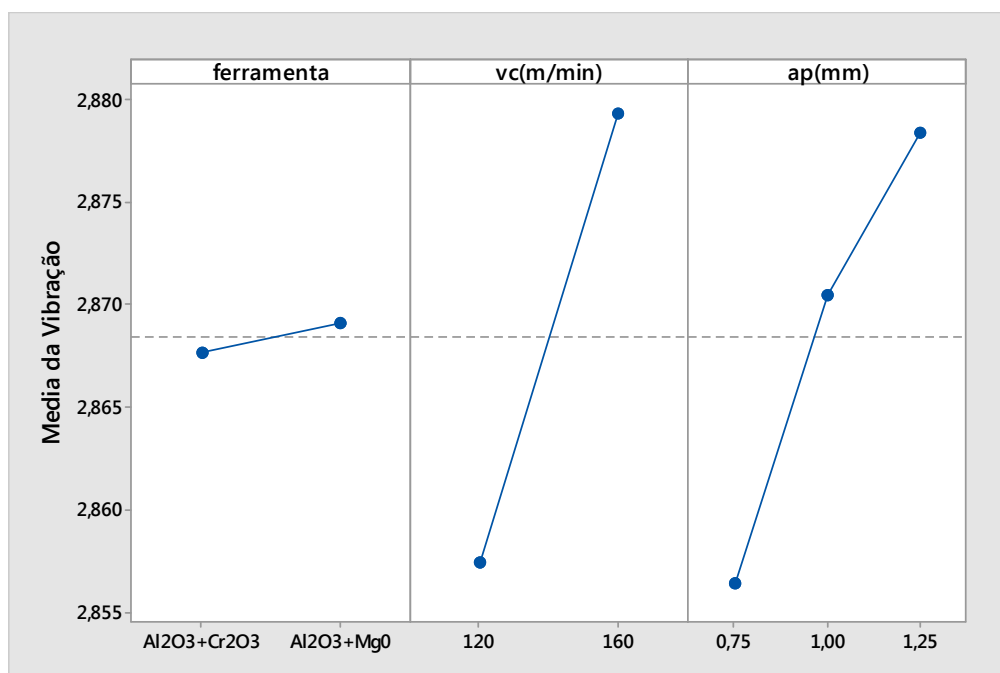
Tabela 5- Análise de variância para Média da vibração versus ferramenta; V_c (m/min); a_p (mm)

Fonte	GL	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Ferramenta	1	0,000013	0,000013	0,13	0,720	0,17
V_c	1	0,002874	0,002874	30,73	0,000	38,15
a_p	2	0,001996	0,000998	10,67	0,002	26,49
Ferramenta * V_c	1	0,000482	0,000482	5,16	0,042	6,40
Ferramenta * a_p	2	0,000679	0,000340	3,63	0,058	9,01
V_c * a_p	2	0,000087	0,000044	0,47	0,638	0,58
Ferramenta * V_c * a_p	2	0,000278	0,000139	1,48	0,266	3,69
Erro	12	0,001122	0,000094			
Total	23	0,007533				

Fonte: autor

A análise de variância mostrou que a influência do fator ferramenta não contribuiu significativamente nos resultados apresentando um valor de Pvalue superior a 0,05.

As interações entre os fatores Ferramenta e V_c e ferramenta e a_p com valores de Pvalue de 0,042 e 0,058 respectivamente influenciaram nos resultados de vibração média com um grau de contribuição crescente de 6,39% para ferramenta e V_c e 9,01% para ferramenta e a_p , mostrando que o fator que mais influenciou no resultado foi o fator velocidade de corte (V_c) descrito anteriormente. Os valores médios de respostas obtidos para vibração estão apresentados na Figura 26.

Figura 26 – Gráfico dos efeitos principais para média da vibração

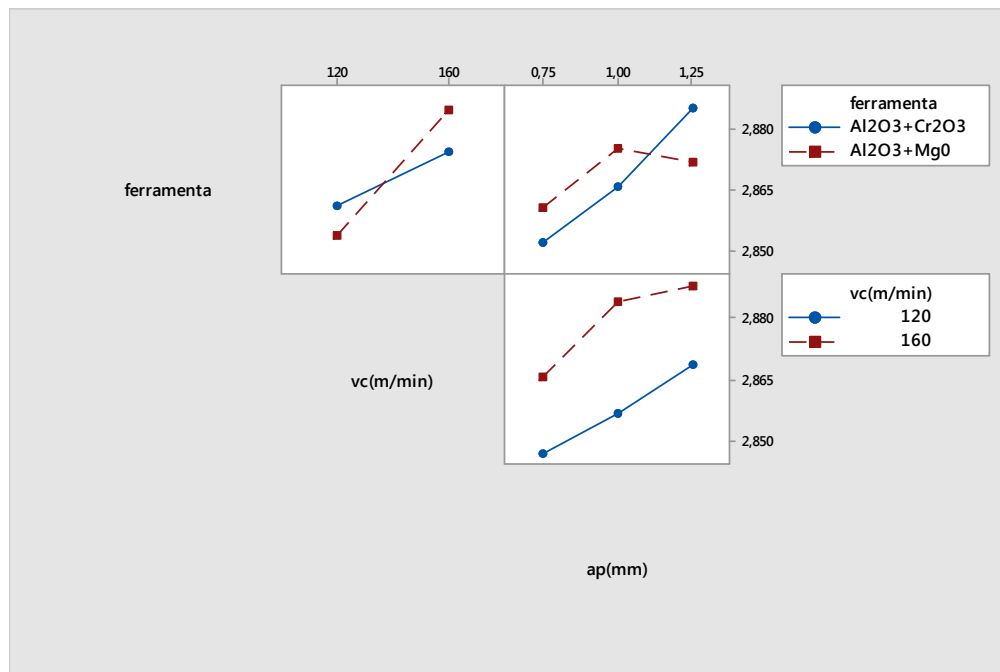
Fonte: autor

Através do gráfico é possível observar que não houve alteração significativa nos resultados de vibração para as ferramentas de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ e $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$. Os resultados mais baixos de vibração são para ferramenta de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ com $V_c=120\text{m/min}$ e $a_p=0,75\text{mm}$.

Com o aumento da profundidade de corte tem-se um aumento da média da vibração, o mesmo pode ser observado para a variável velocidade de corte, esses resultados se deram devido a lascamentos ocorridos durante os ensaios de usinagem.

Na Figura 27 é mostrado os resultados das interações que influenciaram nos resultados onde os valores apresentados pela análise de variância são inferiores a $P\text{value}=0,05$.

Figura 27– Gráfico das interações para média da vibração.



Fonte: autor

O resultado das interações entre ferramenta e V_c mostram que as ferramentas de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ e $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ tiveram melhores resultados para menores velocidades de corte.

Observou-se que a interação entre ferramenta e a_p para menores profundidades de usinagem tem-se resultados melhores para médias da vibração, porém, a ferramenta de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ mostrou uma diminuição nos níveis de vibração para profundidades de usinagem acima de 1,0mm.

O fator profundidade de corte (a_p) contribuiu com 26,49% nos resultados da vibração média e com os dados da ANOVA e teste de TUKEY com 95% de confiabilidade na Tabela 6 foi possível fazer a comparação dos pares e identificar a influência da variação da profundidade de corte (a_p) no resultado.

Tabela 6 – Resultado teste de TUKEY fator a_p versus média vibração

a_p (mm)	N	Mean	Grupo
1,25	8	2,87843	A
1,00	8	2,87047	A B
0,75	8	2,85637	B

Fonte: autor

Os resultados da Tabela 6 mostram que ao usar com $a_p=1,25$ mm (A) e $a_p=1,00$ (AB) não existe diferença para os resultados. O mesmo se aplica para profundidades de 1,00mm (AB) e 0,75mm (B). Entretanto quando se utiliza $a_p=1,25$ mm (A) e $a_p=0,75$ mm (B) tem-se uma alteração nos resultados finais.

4.3 POTÊNCIA

Neste tópico são mostrados a importância dos fatores controlados V_c , a_p e ferramenta ou da interação dos mesmos obtida como resposta na potência de usinagem máxima e média. O fator ou a interação dos fatores com valores de P (pvalue) gerados automaticamente pelo MINITAB inferiores a 0,05 influenciaram significativamente nos resultados.

4.3.1 Média da Potência

Os resultados das análises da variância para a média de potência de usinagem são apresentados na Tabela 07. Os fatores ferramenta, velocidade de corte (V_c) e profundidade de usinagem (a_p) influenciaram significativamente nos resultados médios de potência onde apresentaram valores de Pvalue menores que 0,05.

Tabela 7- Análise de variância para Média da potência versus ferramenta; V_c (m/min); a_p (mm)

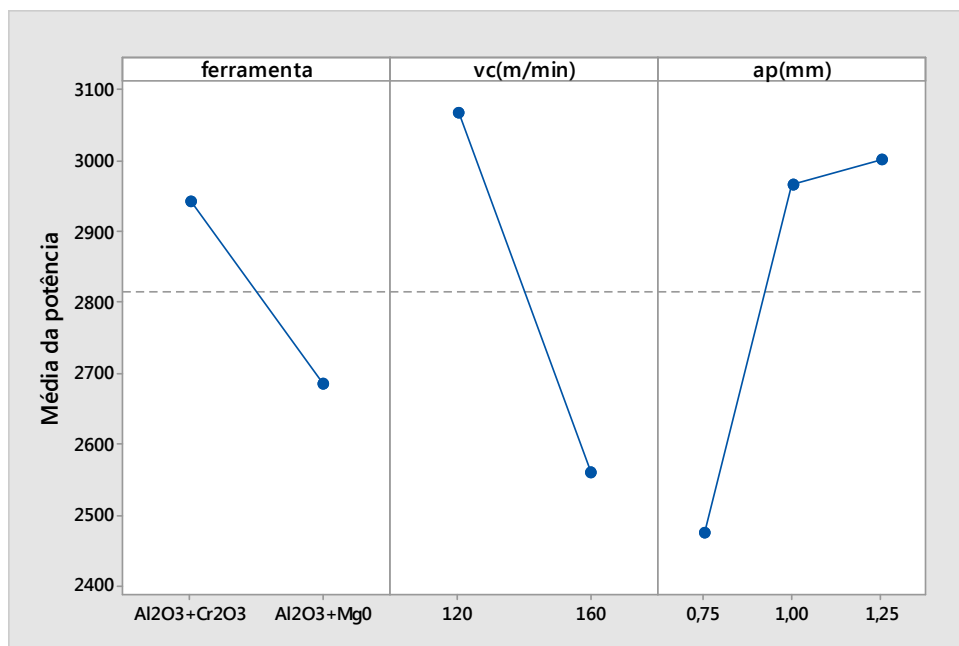
Fonte	GL	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Ferramenta	1	395430	395430	12,16	0,004	9,16
V_c	1	1550477	1550477	47,69	0,000	35,94
a_p	2	1382101	691051	21,26	0,000	32,03
Ferramenta * V_c	1	56147	56147	1,73	0,213	1,30
Ferramenta * a_p	2	222871	111436	3,43	0,066	2,83
V_c * a_p	2	195204	97602	3,00	0,088	4,52
Ferramenta * V_c * a_p	2	122019	61009	1,88	0,195	2,83
Erro	12	390107	32509			
Total	23	4314355				

Fonte: autor

Esses resultados tiveram um grau de contribuição nas repostas de 9,16% para ferramenta, 35,94% para velocidade de corte (V_c) e de 32,03% para profundidade de usinagem (a_p) onde pôde-se afirmar que os parâmetros de corte influenciaram significativamente nos resultados médios de potência já que a contribuição da variável ferramenta foi relativamente menor, entretanto não deve ser desprezado.

Na Figura 28 encontram-se os resultados dos efeitos principais onde é possível analisar cada fator de forma separada sobre a média de potência.

Figura 28 – Gráfico dos efeitos principais para média da potência



Fonte: autor

Os menores valores de potência foram obtidos com a ferramenta Al₂O₃-MgO, $V_c=160\text{m/min}$ e $a_p=0,75\text{mm}$. É possível observar que com o aumento da profundidade de usinagem tem-se um aumento da potência média consumida.

Com aumento da velocidade de corte, observou-se uma diminuição da potência média, isso ocorreu devido ao aquecimento gerado durante a usinagem com ambas ferramentas o que ocasionou aquecimento na superfície de usinagem proporcionando uma diminuição da pressão específica de corte do material usinado.

O fator profundidade de usinagem (a_p) contribuiu com 32,03% nos resultados de potência média e com os dados da ANOVA e teste de TUKEY com 95% de confiabilidade na Tabela 8 foi possível fazer a comparação dos pares e identificar a influência das variações das profundidades de usinagem (a_p) no resultado.

Tabela 8– Resultado teste de TUKEY média da potência versus a_p (mm)

A_p (mm)	N	Mean	Grupo
1,25	8	3001	A
1,00	8	2966,8	A
0,75	8	2475,9	B

Fonte: autor

Os resultados mostraram que ao usinar com $a_p=1,25$ mm (A) ou $a_p=0,75$ mm (B) obteve-se resultados estatisticamente diferentes de potência média. O mesmo aconteceu com a variação de 0,75mm e 1,00mm de profundidade. As profundidades de 1,00mm (A) e 1,25mm (A) estão no mesmo grupo de resultados e exercem uma influência menor nos resultados dentro do fator profundidade de corte (a_p).

4.3.2 Máxima da Potência

Na Tabela 09 encontra-se análise da variância para a Máxima de potência de usinagem. Os fatores ferramenta, velocidade de corte (V_c) e profundidade de corte (a_p) influenciaram significativamente nos resultados de potência onde apresentaram valores de Pvalue menores que 0,05. Os fatores apresentaram um grau de contribuição em ordem crescente de 11,47% para ferramenta ,32,44% para velocidade de corte (V_c) e 33,42% para profundidade de corte. Os resultados apresentados são similares aos encontrados para médias de potência.

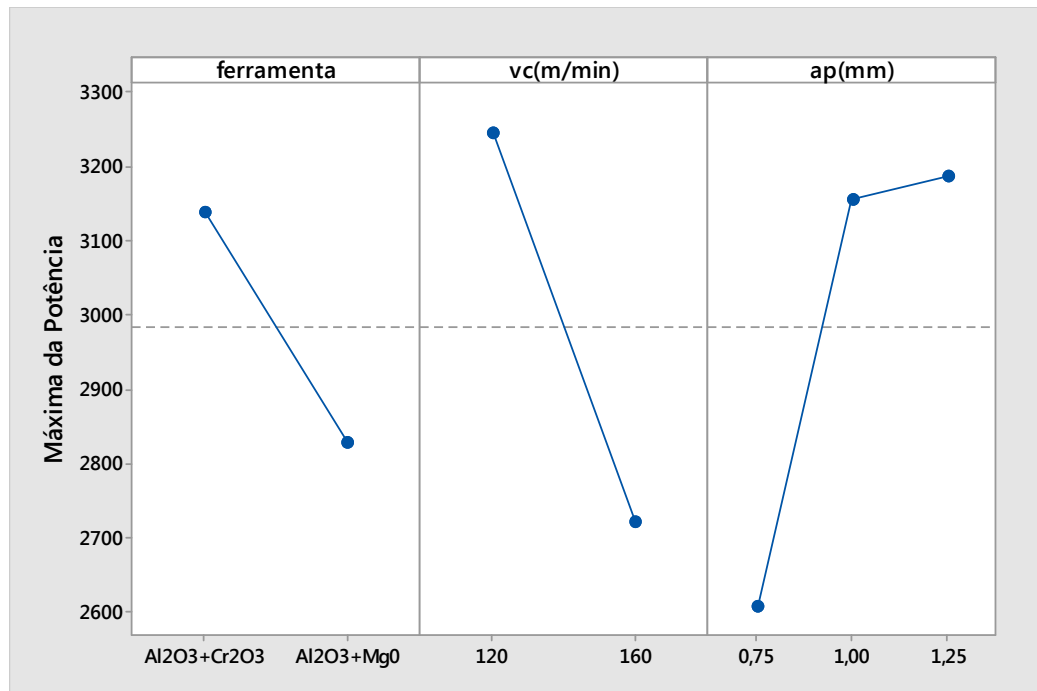
Tabela 9- Análise de variância para Potência Máxima (W) versus ferramenta; V_c (m/min); a_p (mm)

Fonte	GL	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Ferramenta	1	583442	583442	12,55	0,004	11,47
V_c	1	1650506	1650506	35,50	0,000	32,44
a_p	2	1700090	850045	18,28	0,000	33,42
Ferramenta * V_c	1	41271	41271	0,89	0,365	0,81
Ferramenta * a_p	2	235237	117618	2,53	0,121	4,62
V_c * a_p	2	224113	112057	2,41	0,132	4,40
Ferramenta * V_c * a_p	2	94501	47250	1,02	0,391	1,86
Erro	12	557892	46491			
Total	23	5087052				

Fonte: autor

Na figura 29 encontram-se o gráfico dos efeitos principais onde é possível analisar cada fator de forma separada sobre os valores máximos de potência.

Figura 29 – Gráfico dos efeitos principais para potência máxima



Fonte: autor

Os menores valores de potência foram obtidos com a ferramenta Al₂O₃-MgO, V_c=160m/min e a_p=0,75mm. No gráfico é possível observar que o fator profundidade de corte (a_p) entre 0,75mm e 1,00 tem maior influência no resultado.

Como observado nos resultados anteriores de potência média, para velocidade de corte de V_c=160m/min houve uma queda acentuada nos níveis de consumo de potência devido ao aquecimento na superfície de usinagem que proporcionou uma diminuição da pressão específica de corte do material.

A profundidade de corte (a_p) foi o fator com maior contribuição nos resultados com 33,42% de contribuição e com os dados da ANOVA e teste de TUKEY com 95% de confiabilidade na Tabela 10 foi possível fazer a comparação dos pares e identificar a influência das variações das profundidades de corte (a_p) no resultado.

Tabela 10 – Resultado teste de TUKEY para máxima da potência versus a_p (mm)

Ap(mm)	N	Mean	Grupo
1,25	8	3189	A
1,00	8	3155,3	A
0,75	8	2608,0	B

Fonte: autor

Os resultados mostraram que ao usinar com $a_p=1,25\text{mm}$ (A) ou $a_p=0,75\text{mm}$ (B) obteve-se resultados diferentes nas respostas, o mesmo aconteceu com a variação de 0,75mm e 1,00mm de profundidade. As profundidades de 1,00mm (A) e 1,25mm (A) estão no mesmo grupo de resultados e exercem uma influência menor nos resultados dentro do fator profundidade de corte (a_p).

4.4 RUGOSIDADE R_a , R_t e R_z

Neste tópico são apresentados a importância dos fatores controlados ferramenta, V_c e a_p e da interação dos mesmos nas rugosidades R_a , R_t e R_z (μm), obtidos como resposta. Os gráficos e escalas foram gerados automaticamente pelo Software MINITAB e representam o efeito dos fatores ou das interações dos fatores sobre a resposta. O fator ou a interação dos fatores com valores de P (pvalue) gerados automaticamente pelo MINITAB inferiores a 0,05 influenciaram significativamente nos resultados.

4.4.1 Rugosidade R_a

Através de análise dos resultados obtidos na tabela 11, juntamente com a análise de variância e teste de Tukey, verificou-se que a velocidade de corte (V_c) e profundidade de usinagem (a_p) influenciaram significativamente na rugosidade média R_a .

Tabela 11 - Análise de variância para R_a (μm) versus ferramenta; V_c (m/min); a_p (mm)

Fonte	GL	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Ferramenta	1	0,003901	0,003901	0,51	0,480	0,45
V_c	1	0,034061	0,034061	4,41	0,040	3,94
a_p	2	0,224348	0,112174	14,53	0,000	25,97
Ferramenta * V_c	1	0,000968	0,000968	0,13	0,725	0,11
Ferramenta * a_p	2	0,085671	0,042836	5,55	0,006	9,91
V_c * a_p	2	0,036916	0,018458	2,39	0,100	1,71
Ferramenta * V_c * a_p	2	0,014767	0,007383	0,96	0,390	
Erro	60	0,463270	0,007721			
Total	71	0,863903				

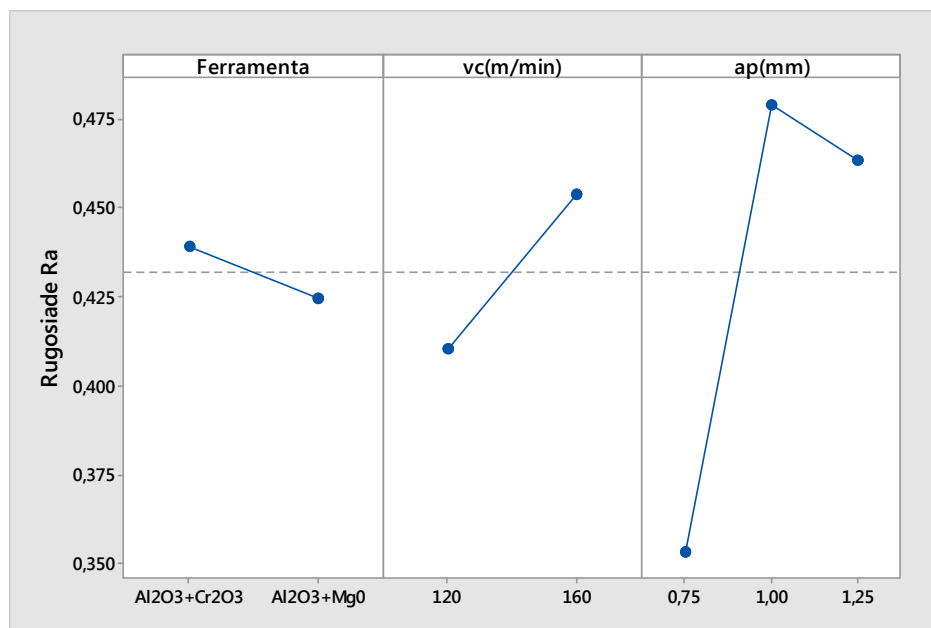
Fonte: autor

O fator velocidade de corte influenciou com o grau de contribuição de 3,94%, (pvalue=0,04) seguido pelo fator profundidade de corte (pvalue=0,00) que teve um grau de

contribuição nos resultados de 25,97%. Esse resultado indicou que maiores velocidades de corte e maiores profundidades de corte proporcionaram maiores rugosidades conforme mostrado na Figura 30.

A interação entre os fatores ferramenta e a_p ($pvalue=0,006$) influenciaram nos resultados de rugosidade com um grau de contribuição de 9,91% no resultado, porém, a interação entre os fatores velocidade de corte e a_p com Fvalue próximo de 2 ($Fvalue=2,39$) indica que a interação teve relevância nos resultados.

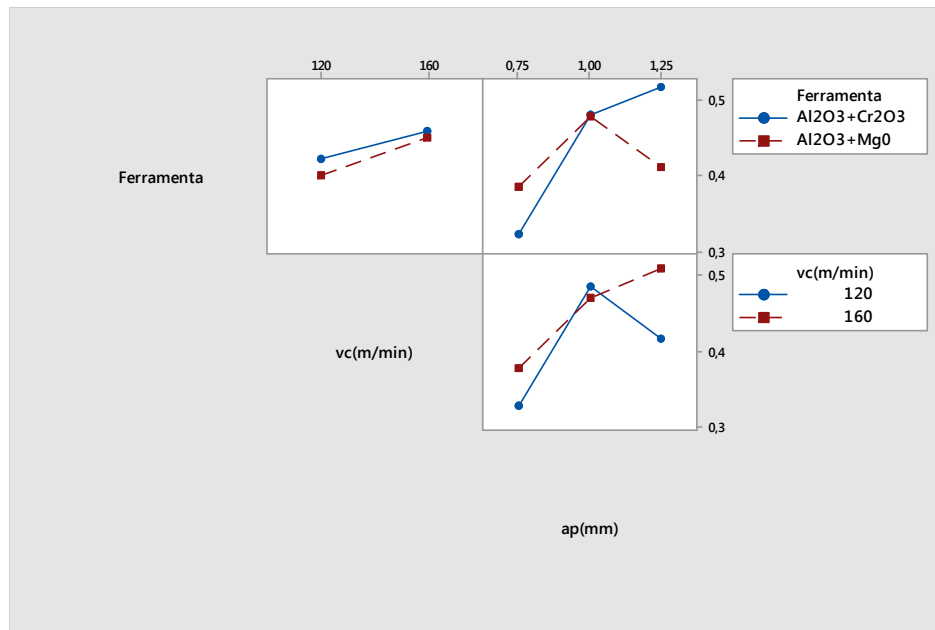
Figura 30 – Gráfico dos efeitos principais para Rugosidade (R_a)



Fonte: autor

Os menores valores de rugosidade foram obtidos com a ferramenta Al_2O_3-MgO , $V_c=120m/min$ e $a_p=0,75mm$. Pode-se observar que as ferramentas tiveram próximos nos resultados e todos os valores de rugosidade obtidos são similares a valores obtidos por processos de retificação. Na Figura 31 é mostrado os resultados das interações que influenciaram nos resultados ou tiveram relevância estatística.

Figura 31– Gráfico das interações para Rugosidade (R_a)



Fonte: autor

O resultado das interações entre ferramenta e a_p são similares para profundidades de usinagem $a_p=1,00$ mm, porém, a ferramenta de Al₂O₃-MgO apresentou uma melhora com níveis de rugosidade mais baixos para $a_p=1,25$ mm do que ferramenta de Al₂O₃-Cr₂O₃.

Em relação a interação entre velocidade de corte e a_p houve resultados similares para profundidades de 1,00 mm, porém, pode-se observar que para maiores velocidades tem-se uma piora das rugosidades R_a .

Contudo, baseado nos resultados de vibração obtidos onde tivemos maiores resultados de vibração pra maiores profundidades e sabendo que a rugosidade não é influenciada pela profundidade de usinagem, o aumento dos níveis de rugosidade para maiores profundidades se deu devido a ruídos gerados pelas vibrações durante os ensaios como lascamentos e quebras da aresta de corte.

Através de teste de TUKEY com 95% de confiabilidade na Tabela 12 e possível fazer a comparação dos pares e identificar a influência das variações das profundidades de corte (a_p) nos resultados de rugosidades.

Tabela 12– Resultado teste de TUKEY para Rugosidade (R_a) versus a_p (mm)

A_p (mm)	N	Mean	Grupo
1,25	24	0,4790	A
1,00	24	0,4637	A
0,75	24	0,3537	B

Fonte: autor

Os resultados mostraram que ao usinarmos com $a_p=1,25\text{mm}$ (A) ou $a_p=0,75\text{mm}$ (B) têm-se resultados diferentes nas respostas, o mesmo aconteceu com a variação de 0,75mm e 1,00mm de profundidade. As profundidades de 1,00mm (A) e 1,25mm(A) estão no mesmo grupo de resultados e exercem uma influência menor nos resultados dentro do fator profundidade de corte (a_p) podendo ser observado no gráfico de efeitos principais para R_a .

Nos valores médios obtidos nos ensaios para a rugosidade R_a pode-se observar conforme Anexo I para ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Cr}_2\text{O}_3$ e Anexo II para ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ que os menores valores obtidos apresentam valores próximos para ambas as ferramentas. Conforme apresentado por Gomes (2016) na Tabela 1, para ferramenta mista $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ obteve-se $R_a = 0,30 \mu\text{m}$ na condição $v_c = 105 \text{ m/min}$, $f = 0,05 \text{ mm/rev}$ e $a_p = 0,20 \text{ mm}$ para usinagem do mesmo material deste estudo. As ferramentas experimentais $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ e $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ apresentaram valores $R_a=0,266 \mu\text{m}$ e $R_a= 286 \mu\text{m}$ respectivamente o que mostra o seu bom desempenho em relação as cerâmicas comerciais.

4.4.2 Rugosidade R_t

Através de análise dos resultados obtidos na Tabela 13, juntamente com a análise de variância e teste de Tukey, verificou-se que os fatores ferramenta, velocidade de corte (V_c) e profundidade de usinagem (a_p) influenciaram nos resultados para rugosidade média R_t .

Tabela 13 - Análise de variância para R_t (μm) versus Ferramenta; V_c (m/min); a_p (mm)

Fonte	GL	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Ferramenta	1	2,462	2,4620	3,46	0,068	2,38
V_c	1	8,639	8,6389	12,14	0,001	8,36
a_p	2	17,299	8,6493	12,15	0,000	16,74
Ferramenta * V_c	1	1,601	1,6015	2,25	0,139	1,55
Ferramenta * a_p	2	22,747	11,3736	15,98	0,000	22,01
V_c * a_p	2	5,998	2,9992	4,21	0,019	5,80
Ferramenta * V_c * a_p	2	1,853	0,9265	1,30	0,280	1,79
Erro	60	42,709	0,7118			
Total	71	103,308				

Fonte: autor

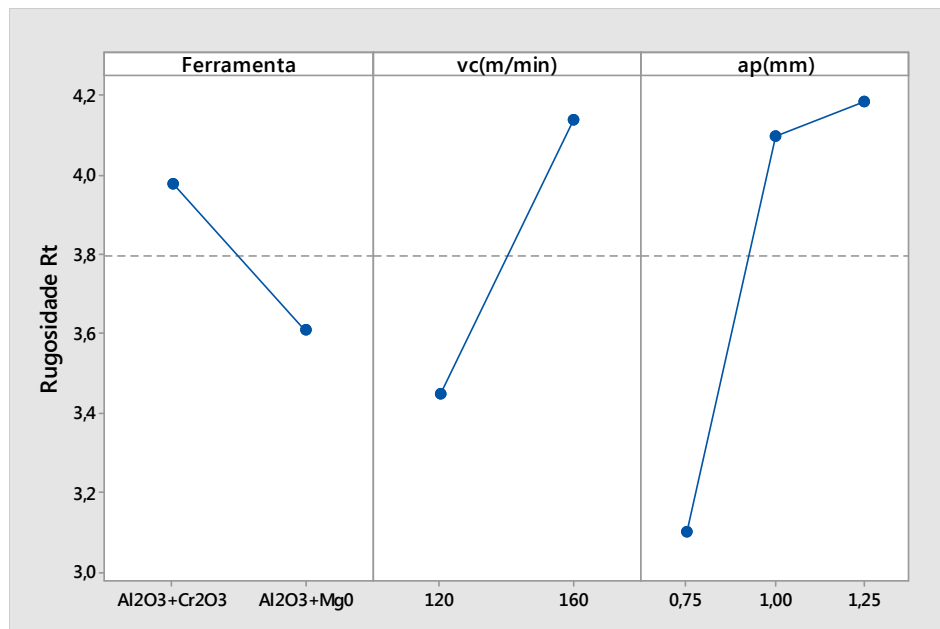
Os fatores que mais influenciaram estatisticamente nos resultados foram profundidade de usinagem com grau de contribuição de 16,74%, (pvalue=0,000) seguido pelo fator velocidade de corte (pvalue=0,001) que teve um grau de contribuição nos resultados de 8,36%.

Apesar do fator ferramenta estar acima com significância na resposta superior a 5% contribuiu com 2,38% nos resultados e não deve ser descartado.

A interação entre os fatores ferramenta e a_p ($pvalue=0,000$) e velocidade de corte e a_p ($pvalue=0,019$) influenciaram nos resultados de Rugosidade. A interação Velocidade de corte e a_p com grau de contribuição de 22,02% foi a interação dos fatores que mais influenciou nos resultados. Os fatores ferramenta e V_c com Fvalue próximo de 2 ($Fvalue=1,25$) onde indica uma relevância estatística nos resultados e não devem ser descartados.

Na figura 32 encontram-se o gráfico dos efeitos principais onde é possível analisar cada fator de forma separada sobre os valores máximos de rugosidade R_t .

Figura 32– Gráfico dos efeitos principais para Rugosidade (R_t)



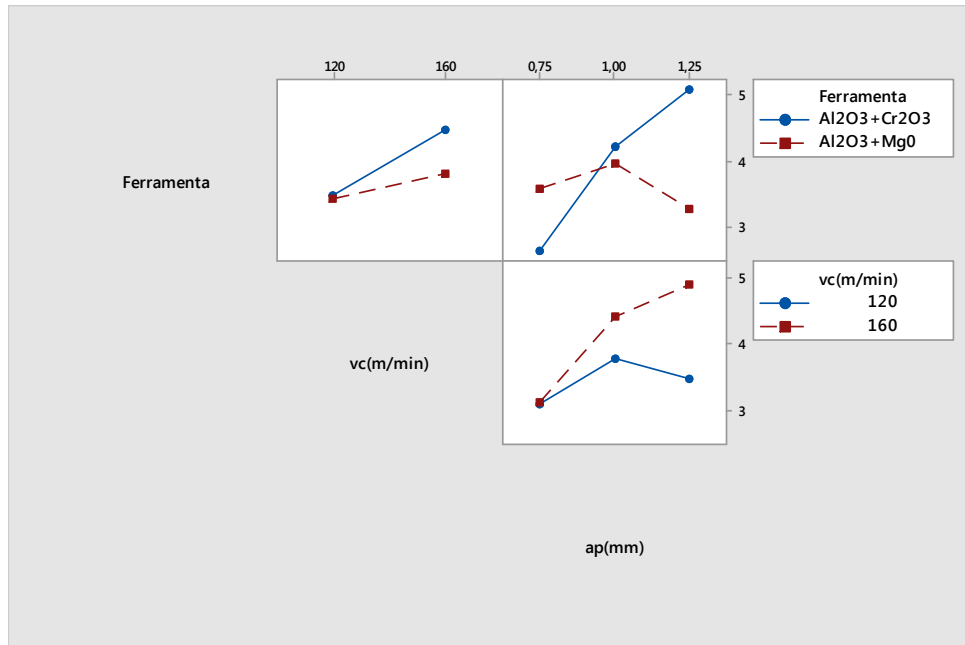
Fonte: autor

Os menores valores de rugosidade foram obtidos com a ferramenta Al₂O₃-MgO, $V_c=120m/min$ e $a_p=0,75mm$. Os três fatores apresentaram uma diferença significativa nas rugosidades R_t , entretanto pode-se observar piores resultados para maiores velocidades e maior profundidades de corte.

Os resultados encontrados para R_t são resultados acima do esperado para processos de retificação. Os valores de R_t são mais sensíveis com relação a defeitos pontuais nas superfícies como riscos e se apresentaram maiores para maiores profundidades de usinagem devido a avarias ocorridas nas arestas de corte já que a variável profundidade de usinagem não deveria exercer alterações nas rugosidades.

Na Figura 33 é mostrado os resultados das interações que influenciaram nos resultados ou tiveram relevância estatística.

Figura 33– Gráfico das interações para Rugosidade (R_t)



Fonte: autor

O resultado das interações entre ferramenta e a_p mostra uma queda nos níveis de rugosidade para ferramenta Al₂O₃-MgO com profundidade de corte de 1,25mm. Para essa ferramenta, observou-se menores incidências de avarias nas arestas de corte e pode ser observado que a variável a_p teve menor influência em relação a Al₂O₃-Cr₂O₃.

A interação entre velocidade de corte e a_p onde houve maior contribuição no resultado nos mostrou que para o $V_c=120\text{m/min}$ e $a_p=0,75\text{mm}$ tem-se os melhores resultados de rugosidade R_t para ambas ferramentas.

Através de teste de TUKEY mostrado na Tabela 14 foi possível fazer a comparação dos pares para os três níveis de profundidade de corte e identificar a influência das variações nos resultados de rugosidades R_t .

Tabela 14– Resultado teste de TUKEY para Rugosidade (R_t) versus a_p (mm)

$A_p(\text{mm})$	N	Mean	Grupo
1,25	24	4,184	A
1,00	24	4,097	A
0,75	24	3,103	B

Fonte: autor

Os resultados mostraram que ao usinarmos com $a_p=1,25\text{mm}$ (A) ou $a_p=0,75\text{mm}$ (B) têm-se resultados diferentes nas respostas, o mesmo aconteceu com a variação de 0,75mm e 1,00mm de profundidade. As profundidades de 1,00mm (A) e 1,25mm (A) estão no mesmo grupo de resultados e exercem uma influência menor nos resultados dentro do fator profundidade de corte podendo ser observado no gráfico dos efeitos principais para R_t .

4.4.3 Rugosidade R_z

Através de análise dos resultados obtidos na Tabela 15, juntamente com a análise de variância e teste de Tukey, verificou-se que os fatores velocidade de corte (V_c) e profundidade de usinagem (a_p) influenciaram significativamente na rugosidade média R_z .

A análise de variância mostrou que a influência do fator ferramenta não contribuiu significativamente nos resultados apresentando um valor de Pvalue superior a 0,05, entretanto, apresentou um Fvalue próximo de 2 (Fvalue=1,87) indicando uma relevância estatística para os resultados.

Tabela 15 - Análise de variância para R_z (um) versus Ferramenta; V_c (m/min); a_p (mm)

Fonte	GL	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Ferramenta	1	0,4329	0,4329	1,87	0,177	1,25
V_c	1	1,9283	1,9283	8,33	0,005	5,60
a_p	2	5,8593	2,9297	12,65	0,000	17,0
Ferramenta * V_c	1	0,2277	0,2277	0,98	0,325	0,66
Ferramenta * a_p	2	10,1256	5,0628	21,87	0,000	29,37
V_c * a_p	2	1,2977	0,6489	2,80	0,069	3,76
Ferramenta * V_c * a_p	2	0,7031	0,3516	1,52	0,227	2,03
Erro	60	13,8928	0,2315			
Total	71	34,4676				

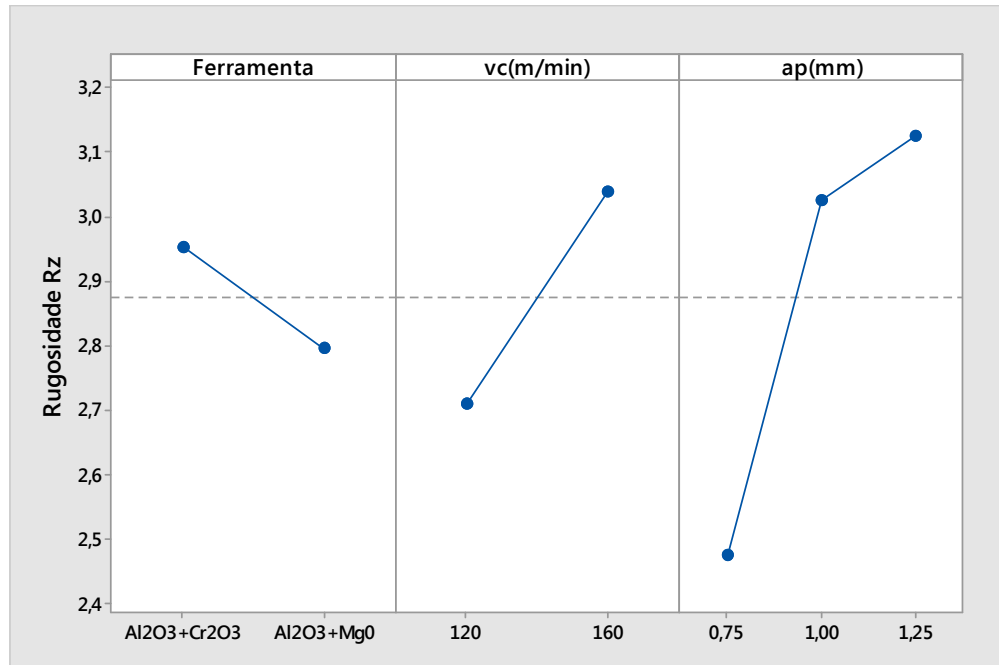
Fonte: autor

Os fatores velocidade de corte (V_c) e profundidade de usinagem (a_p) influenciaram significativamente nos resultados médios de rugosidade R_z com valores de P de 0,005 e 0,000 respectivamente. Esses valores apresentaram um grau de contribuição no resultado de 5,6% para velocidade de corte (V_c) e 17% para profundidade de corte (a_p).

A interação entre os fatores ferramenta e a_p (pvalue=0,000) influenciaram nos resultados de rugosidade R_z com um grau de contribuição de 29,37%. Mesmo com significância na resposta superior a 5% (pvalue=0,069) a interação entre os fatores velocidade de corte e a_p

tiveram uma contribuição de 3,76%. Na Figura 34 é mostrado os resultados das interações que influenciaram nos resultados ou tiveram relevância estatística.

Figura 34– Gráfico dos efeitos principais para Rugosidade (R_z)

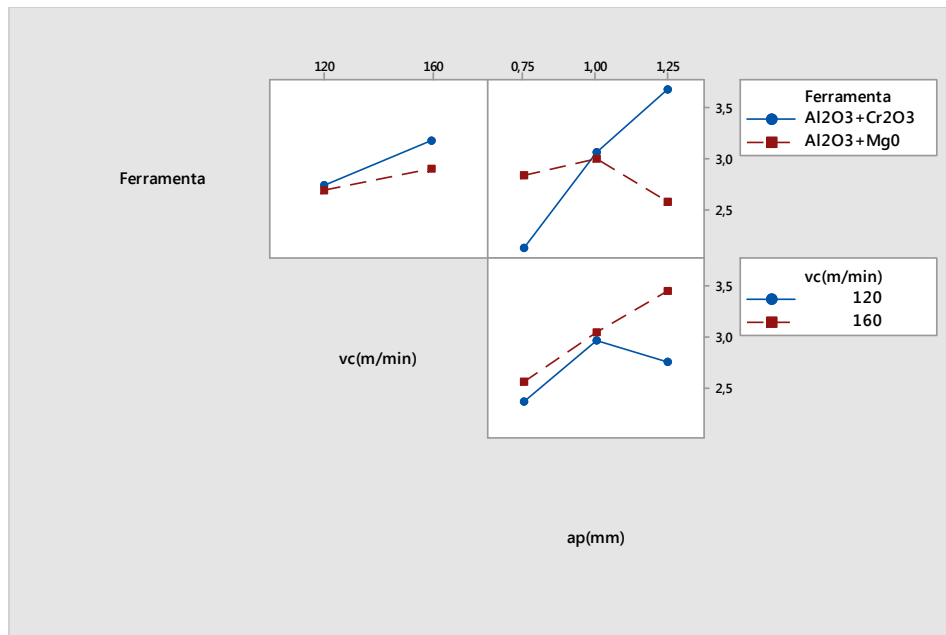


Fonte: autor

Os menores valores de rugosidade foram obtidos com a ferramenta Al₂O₃-MgO, $V_c=120\text{m/min}$ e $a_p=0,75\text{mm}$. Os três fatores apresentaram uma diferença significativa nas rugosidades R_z .

Para as profundidades de usinagem entre 0,75mm e 1,00mm houve um aumento significativo nas rugosidades R_z , o mesmo pode ser observado para os fatores velocidade de corte. Esses resultados maiores de rugosidades para maiores profundidades são resultados similares aos obtidos nas medições para rugosidades R_a e R_t . Na Figura 35 são mostrados os resultados das interações que influenciaram nos resultados ou tiveram relevância estatística.

Figura 35– Gráfico das interações para Rugosidade (R_z)



Fonte: autor

O resultado das interações entre ferramenta e a_p mostraram que ao usinar com $a_p=1,25$ mm com ferramenta $Al_2O_3-Cr_2O_3$ têm-se os piores resultados de rugosidade, porém, observou-se uma melhora na rugosidade para ferramenta de Al_2O_3-MgO para as mesmas profundidades podendo ser observado. O gráfico mostra também os resultados das interações entre velocidade de corte e a_p onde tem-se um aumento da rugosidade para $V_c=120$ m/min.

Através de teste de TUKEY mostrado na Tabela 15 foi possível fazer a comparação dos pares para os três níveis de profundidade de corte (a_p) e identificar a influência das variações nos resultados de rugosidades R_z .

Tabela 16 – Resultado teste de TUKEY para Rugosidade (R_z) versus a_p (mm)

A_p (mm)	N	Mean	Grupo
1,25	24	3,124	A
1,00	24	3,0249	A
0,75	24	2,475	B

Fonte: autor

Os resultados mostraram que se usarmos com $a_p=1,25$ mm (A) ou $a_p=0,75$ mm (B) têm-se resultados diferentes nas respostas, o mesmo aconteceu com a variação de 0,75mm e 1,00mm de profundidade. As profundidades de 1,00mm (A) e 1,25mm (A) estão no mesmo grupo de resultados e exercem uma influência menor nos resultados dentro do fator

profundidade de corte (a_p) podendo ser observado claramente no gráfico de efeitos principais para rugosidade R_z . (Figura 34)

4.5 DESGASTE DAS FERRAMENTAS

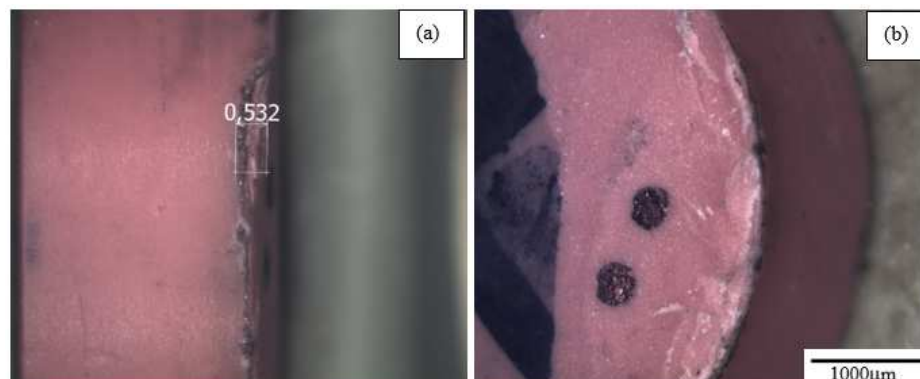
Será apresentado os casos no quais as ferramentas apresentaram maior e menor rugosidade R_a e maior e menor desgaste ou avarias conforme mostrado no ANEXO I para ferramenta de $Al_2O_3-Cr_2O_3$ e ANEXO II para ferramenta Al_2O_3-MgO . Neste estudo a rugosidade é a variável de saída determinante para qualidade em usinagem de aços endurecidos buscando a substituição das etapas de retificação. Os comportamentos de emissão, vibração e potência serão avaliados de acordo com os resultados de desgaste e avarias das ferramentas.

4.5.1 Desgaste e avaria da ferramenta $Al_2O_3-Cr_2O_3$

A ferramenta de $Al_2O_3-Cr_2O_3$ foi a primeira ferramenta submetida aos ensaios de usinagem que foram numerados de 1 a 12, foram realizadas 2 repetições para cada condição de parâmetro de corte.

O Ensaio 2 (F5, LA, A2) da ferramenta de $Al_2O_3-Cr_2O_3$ foi o que apresentou menor R_a médio= $0,266\mu m$ e também o menor desgaste de flanco $V_b=0,532mm$ para $L_f=40mm$. Neste ensaio foram utilizados $V_c=120$ m/min; $f=0,05mm/rev$; $a_p=0,75mm$ como parâmetros de entrada onde é possível observar lascamento da aresta de corte. (Figura 36).

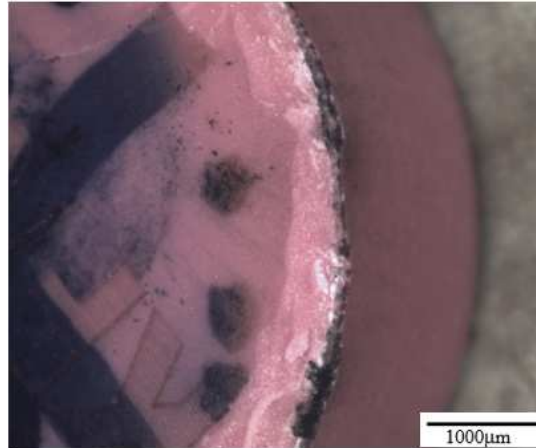
Figura 36– (a) Desgaste de flanco $V_b(mm)$ e (b) lascamento Ensaio 2



Fonte: autor

No Ensaio 11(F6, LA, A3), apresentou o maior valor de rugosidade R_a médio=0,605 μ m, com $V_c=160$ m/min; $f=0,05$ mm/rev; $a_p=1,25$ mm e $V_b=0,582$ mm. Observou-se a avaria de lascamento na aresta de corte (Figura 37).

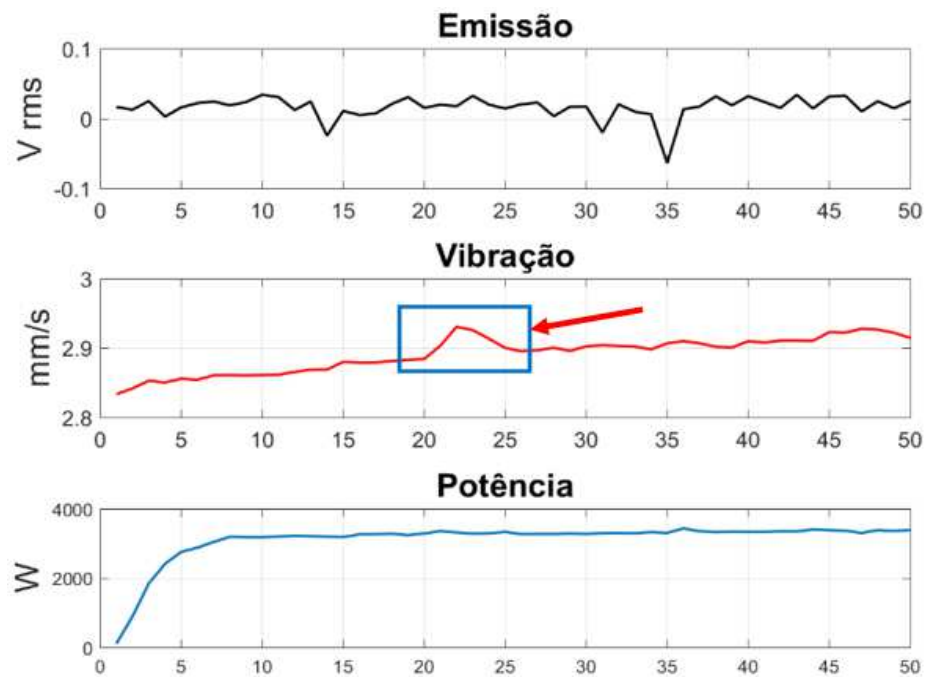
Figura 37–lascamento aresta 3, ferramenta 6, Ensaio 11.



Fonte: autor

Na Figura 38 é possível observar através do gráfico de vibração do Ensaio 11 um pico onde possivelmente houve o lascamento da aresta de corte e que contribuiu para o aumento da rugosidade na superfície usinada.

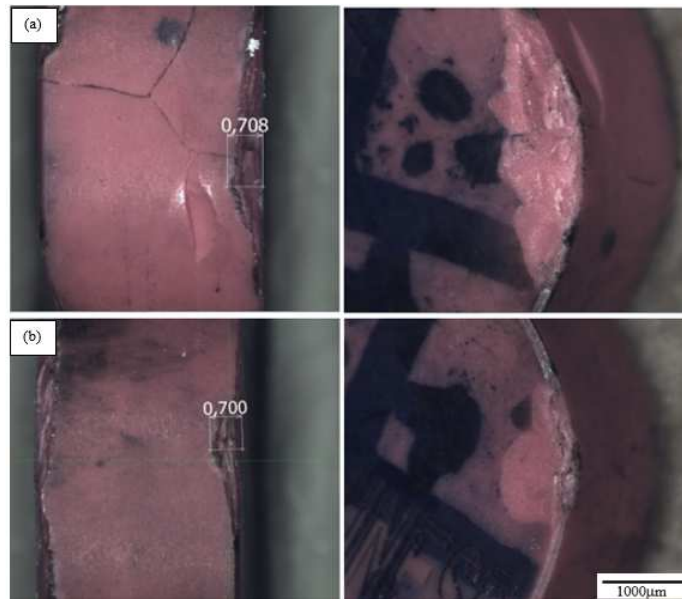
Figura 38–Gráfico de emissão Acústica, Vibração e Potência Ensaio 11.



Fonte: autor

Os Ensaios 5 e 6 (F5, LB, A1 e F5, LB, A2), foram os ensaios que apresentaram maior desgaste de flanco com $V_b=0,700$ e $0,708$ mm respectivamente, onde foram consideradas as mesmas condições de corte com $V_c=120\text{m/min}$; $f=0,05\text{mm/rev}$; $a_p=1,25\text{mm}$. Observou-se pontos de lascamento na aresta de corte durante o Ensaio 5 e trincas no Ensaio 6 (Figura 39).

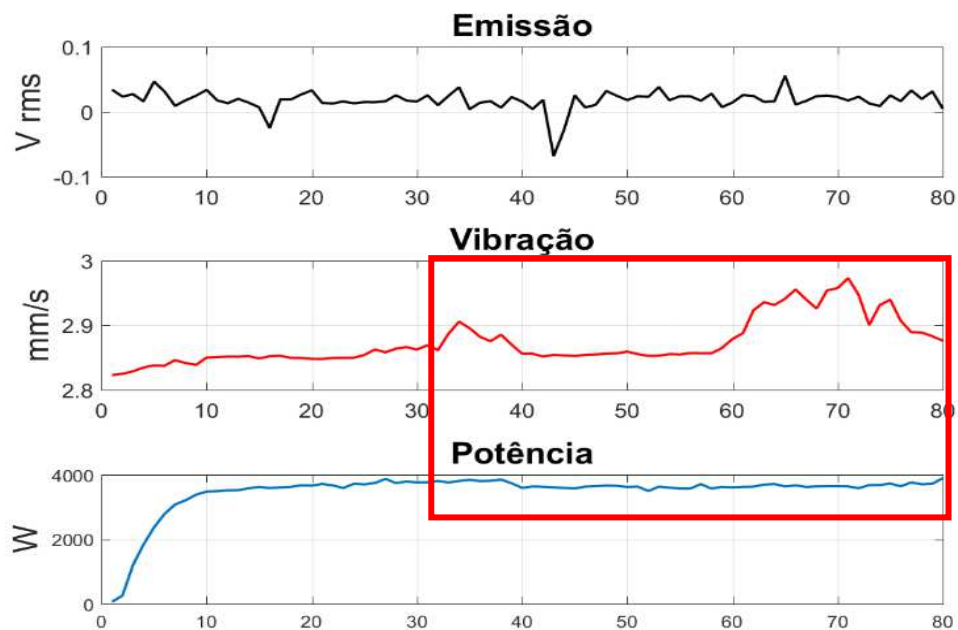
Figura 39– (a) Desgaste Ensaio 5, (b) Desgaste Ensaio (6).



Fonte: autor

Para o Ensaio 6 onde observa-se trincas, tem-se uma variação nos níveis de vibração e uma diminuição nos níveis de potência onde a ferramenta perdeu contato com a peça devido ao lascamento (Figura 40).

Figura 40–Gráfico de emissão Acústica, Vibração e Potência Ensaio 6.



Fonte: autor

Este ensaio apresentou R_a médio = $0,430\mu\text{m}$ dentro dos níveis aceitáveis em comparação ao processo de retificação.

Para ferramenta avaliada, observou-se lascamentos nos ensaios 3 e 4 e 7 a 10 e 12, porém, os níveis de rugosidade se mantiveram dentro do esperado se comparado ao processo de retificação.

Para $V_c=120\text{m/min}$ o menor valor de rugosidade ocorreu no ensaio 2 e para $V_c=160\text{m/min}$ o menor valor de rugosidade ocorreu no Ensaio 7, ambos utilizando o mesmo $a_p=0,75\text{mm}$.

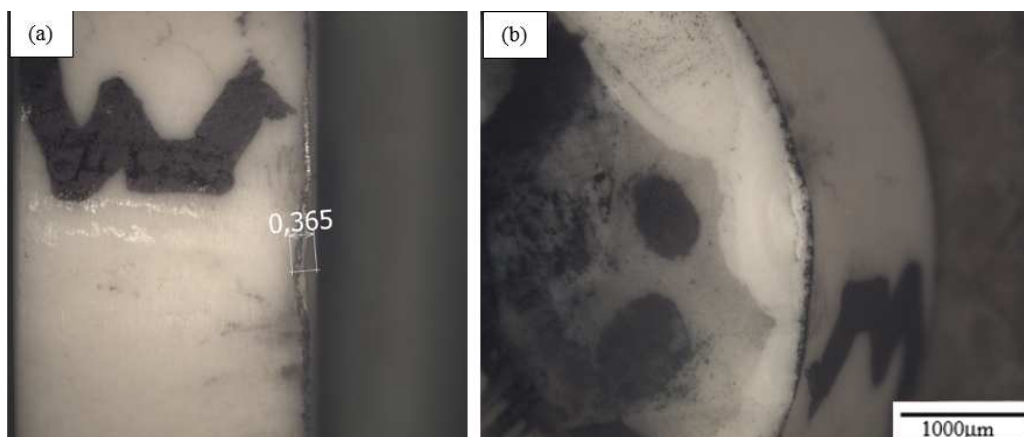
Observou-se que as menores rugosidades foram encontradas utilizando menores profundidades de usinagem e as rugosidades mais altas ocorreram em maiores profundidades, isso ocorreu devido a avarias nas arestas de corte que proporcionaram maiores vibrações que influenciaram nos resultados de rugosidade R_a , R_t e R_z .

4.5.2 Desgaste e avaria da ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$.

A ferramenta de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ representa os ensaios de usinagem numerados de 13 a 24 e também foram realizadas 2 repetições para cada condição de parâmetro de corte.

O Ensaio 19 (F2, LA, A3) da ferramenta de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ foi o que apresentou menor R_a médio= $0,286\mu\text{m}$ e $V_b=0,365\text{mm}$. Neste ensaio foram utilizados $V_c=120\text{ m/min}$; $f=0,05\text{mm/rev}$; $a_p=0,75\text{mm}$ como parâmetros de entrada em análise microscópica verifica-se o desgaste de flanco e é possível observar também lascamento da aresta de corte (Figura 41).

Figura 41– (a) Desgaste de flanco $V_b(\text{mm})$ e (b) lascamento do Ensaio 19.

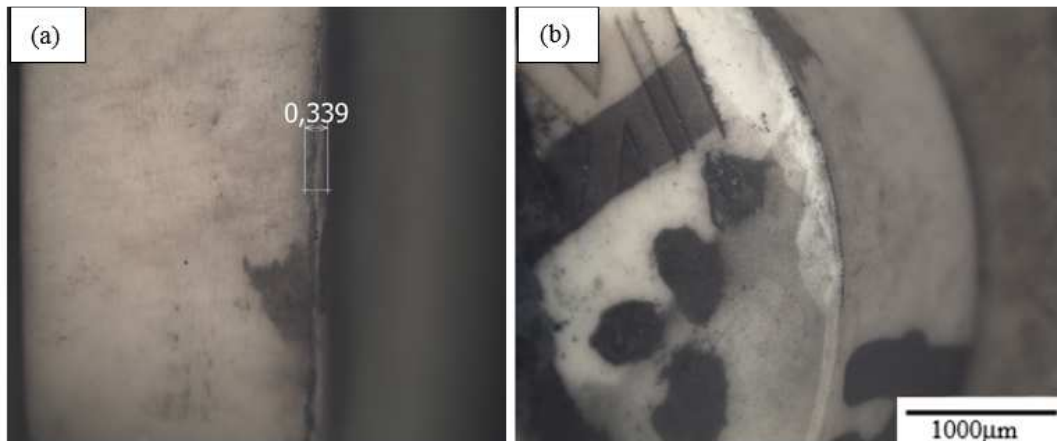


Fonte: autor

Para o maior valor de rugosidade, o Ensaio 20 (F2, LA, A4), apresentou o maior R_a médio= $0,554\mu\text{m}$, com $V_c=160\text{m/min}$; $f=0,05\text{mm/rev}$; $a_p=0,75\text{mm}$ de condições de corte. Este mesmo ensaio também apresentou o menor valor de desgaste $V_b=0,339\text{ mm}$ conforme apresentado na Figura 42a.

Este ensaio apresentou lascamento da aresta de corte e foi realizado nas mesmas condições do ensaio 19 (Figura 42b) e também apresenta lascamento.

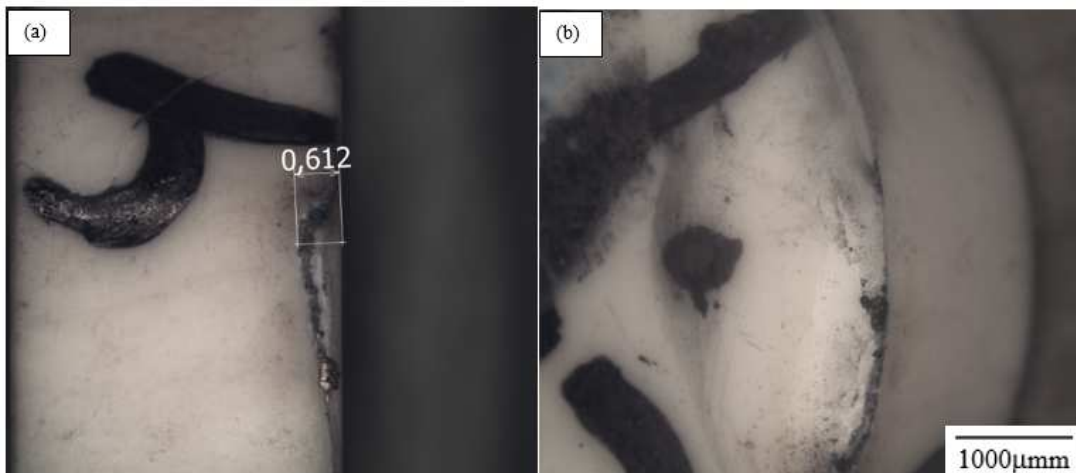
Figura 42– (a) Desgaste de flanco $V_b(\text{mm})$ e (b) lascamento do Ensaio 20.



Fonte: autor

O maior valor de desgaste foi encontrado no Ensaio 24 (F3, LB, A1) com $V_b=0,612\text{mm}$ (Figura 43a) onde foram considerados $V_c=160\text{m/min}$; $f=0,05\text{mm/rev}$; $a_p=1,25\text{mm}$. O ensaio apresentou lascamento na aresta de corte (Figura 43b).

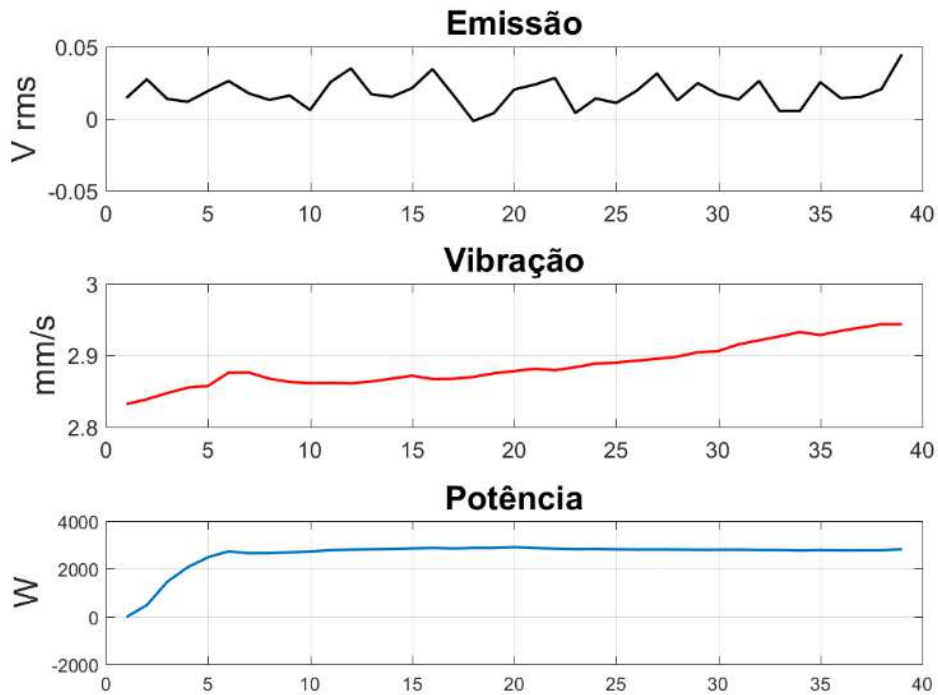
Figura 43– (a) Desgaste de flanco $V_b(\text{mm})$ e (b) lascamento da ferramenta Ensaio 24.



Fonte: autor

Neste ensaio onde foi encontrado o maior valor de desgaste de flanco, houve um aumento nos níveis de vibração (Figura 44), porém, foi encontrado na medição R_a médio = $0,415\mu\text{m}$.

Figura 44–Gráfico de emissão Acústica, Vibração e Potência Ensaio 6.



Fonte: autor

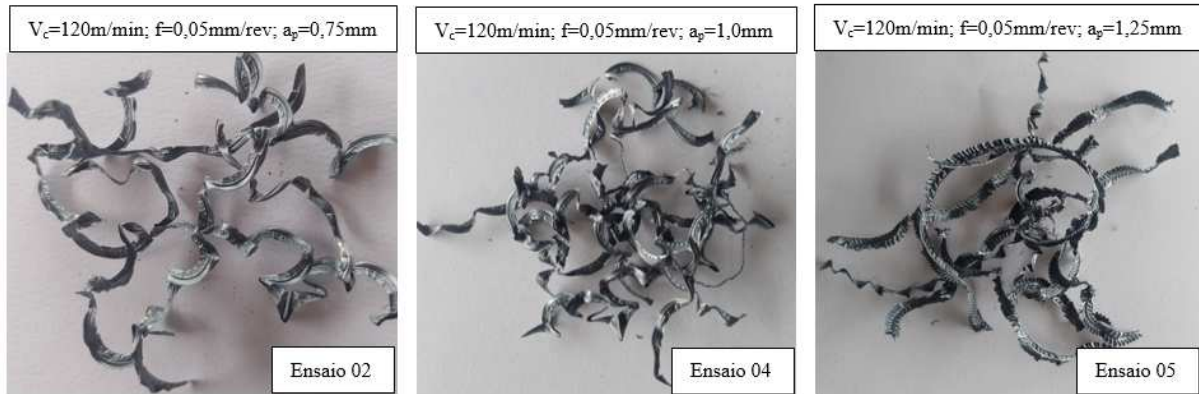
A ferramenta de óxido de alumínio dopada com magnésio apresentou os menores níveis de desgaste de flanco se comparada com a ferramenta dopada com cromo e se mostrou mais resistente quanto a lascamentos e quebras. As análises de variância para as rugosidades R_a , R_t e R_z mostrou os melhores resultados de rugosidade com a ferramenta de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ utilizando $a_p=0,75\text{mm}$ e $V_c=120\text{m/min}$, a usinagem com maiores profundidades de usinagem apresentaram maiores valores de vibração devido a avarias nas arestas de corte que influenciaram nos resultados de rugosidade.

4.6 ANÁLISE DOS CAVACOS NOS ENSAIOS

No geral, as formas de cavaco observadas foram classificadas como emaranhado, a qual é caracterizada como um meio termo entre fita emaranhada e helicoidal na cor cinza metálico e também fragmentado com conexões. Observou-se que o tipo de cavaco para cada repetição foi o mesmo.

Os cavacos para ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ onde foram utilizados $V_c=120\text{m/min}$ são apresentados na Figura 45. Observou-se de forma visual que a profundidade de corte foi o fator que teve influência na forma dos cavacos, conforme pode ser observado.

Figura 45–Cavacos para ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ ensaio 2, 4 e 5.



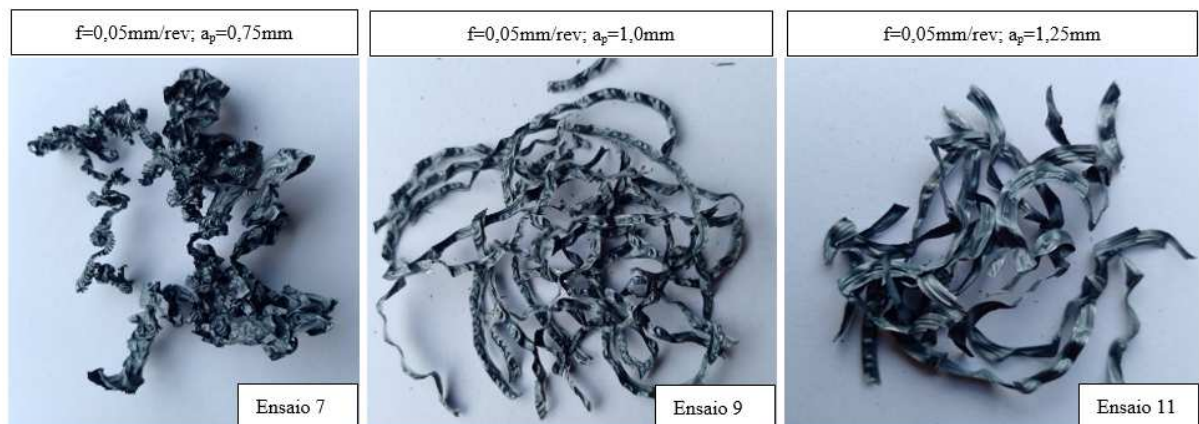
Fonte: autor

Todos ensaios foram realizados com a mesma velocidade de corte e avanço variando somente profundidade de corte. Para $a_p=0,75\text{mm}$ e $1,00\text{mm}$, os cavacos apresentaram-se na forma mais de fita emaranhada e se apresentando um pouco mais fragmentado para $a_p=1,25\text{mm}$.

Na Figura 46 são apresentados os cavacos gerados durante a usinagem com a ferramenta de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ com $V_c=160\text{m/min}$ e variação de profundidade de corte de $0,75$ a $1,25\text{mm}$.

Os ensaios 9 e 11 apresentaram formas similares de cavacos, porém, um pouco mais em forma de arco longo para $a_p=1,25\text{mm}$ no ensaio 11.

Figura 46–Cavacos para ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ ensaio 7, 9 e 11.

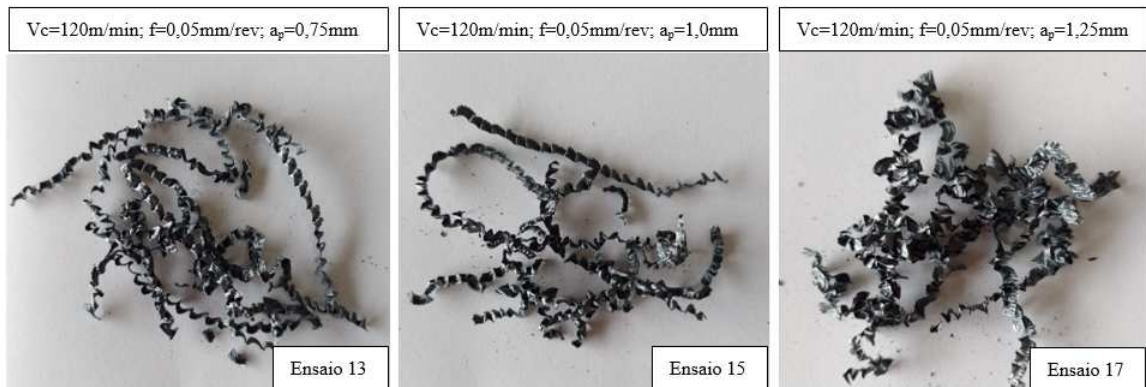


Fonte: autor

O cavaco do Ensaio 7 deveria apresentar a mesma forma dos ensaios 9 e 11 e devido à quebra da ferramenta apresentou um cavaco mais arrancado.

As ferramentas de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ tiveram comportamento similares dos cavacos gerados durante os ensaios utilizando $V_c=120\text{m/min}$ (Figura 47), porém, apresentaram cavacos um pouco mais fragmentados com conexões. Para as variações de profundidade de corte não houve mudanças visualmente significativas nas formas dos cavacos.

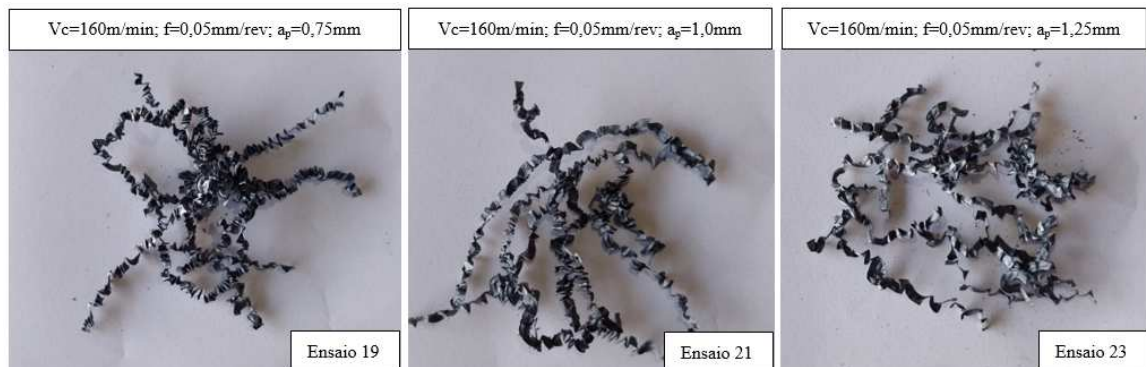
Figura 47–Cavacos para ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ ensaio 13, 14 e 15.



Fonte: autor

Os cavacos para ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ são apresentados na Figura 48, para a maior velocidade de corte de 160m/min , observa-se cavacos mais fragmentados com conexões similares aos cavacos gerados com menores velocidades.

Figura 48–Cavacos para ferramenta $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ ensaio 19, 21 e 23.



Fonte: autor

Observou-se que no torneamento duro do Aço ABNT 52100 os cavacos gerados na forma fragmentada com conexões, helicoidal e os ensaios realizados com as velocidades mais altas obtendo cavacos com lascas dente de serra se mostra conforme observado por Panda *et*

al (2018). Observou-se também cavacos mais largos quando usinado com profundidades maiores onde se observou os maiores índices de avarias.

5 CONCLUSÃO

Conforme os resultados encontrados durante as análises realizadas neste estudo, apresentam-se as seguintes conclusões:

- Com os resultados obtidos para emissão acústica máxima as melhores combinações que geraram os menores resultados foram $V_c=160\text{m/min}$, $a_p=1,00\text{mm}$ utilizando a ferramenta de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$. O resultado das interações entre velocidade de corte e a_p mostraram resultados mais baixos de máxima de emissão acústica para $V_c=160\text{m/min}$ e $a_p=1,25\text{mm}$ e foram os fatores que mais influenciaram nos resultados.

- As ferramentas $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ e $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ não tiveram influência significativa para os resultados médios de vibração onde os fatores que tiveram maior influência foram velocidade de corte (V_c) e profundidade de usinagem (a_p). Para maiores profundidades de usinagem houve um aumento dos níveis de vibração ocasionado lascamentos nas arestas de corte. Os resultados mais satisfatórios, ou seja, onde observou-se menores valores médios de vibração foram com $V_c=120\text{m/min}$ e $a_p=0,75\text{mm}$, entretanto, o teste de Tukey mostrou que a variável a_p não tem influência nos resultados dentro de uma variação de $0,25\text{mm}$.

- Os resultados apresentados para potência máxima e potência média mostram que os menores consumos de potência foram com $a_p=0,75\text{mm}$ onde a ferramenta de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ obteve os melhores resultados com maiores velocidades $V_c=160\text{m/min}$. Houve um aumento de potência para maiores profundidades de usinagem, porém, ocorreu uma diminuição para maiores velocidades de corte devido ao aquecimento gerado na superfície de usinagem que proporcionou uma diminuição da pressão específica de corte.

-Para as rugosidades R_a , R_t e R_z o fator a_p foi o fator que mais influenciou nos resultados, porém, com a ferramenta de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$, $V_c=120\text{m/min}$ e $a_p=0,75$ observou-se os melhores resultados de rugosidade para os três fatores. Apesar dos resultados de rugosidades R_a estarem dentro dos níveis aceitáveis em comparação ao processo de retificação o aumento da vibração em maiores profundidades de usinagem elevaram os resultados de rugosidades R_t e R_z , pois esses valores são mais sensíveis a defeitos pontuais nas superfícies.

-Para ambas as ferramentas tivemos resultados similares para os resultados de rugosidade, porém, a ferramenta cerâmica dopada com magnésio apresentou os melhores resultados e se mostrou mais promissora.

-Com os resultados obtidos neste projeto foi demonstrado que é possível em superfícies torneadas do Aço ABNT 52100 com dureza em torno de 68 HRC sem a utilização de

refrigeração substituir o processo de retificação durante a manufatura de um determinado produto quando o requisito é atingir rugosidades R_a menores que $0,8 \mu\text{m}$.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, avaliar os comportamentos das ferramentas cerâmicas de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ e $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ para diferentes geometrias da aresta de corte. Avaliar os resultados de emissão acústica e vibração em diferentes chanfros nas arestas de corte, pois os resultados apresentaram repetidos lascamentos e níveis elevados de vibração que prejudicaram os resultados de rugosidade.

Avaliar as ferramentas estudadas em velocidades de corte mais elevadas para o mesmo valor de avanço $0,05\text{mm/rev.}$ e menores profundidades de usinagem e realizar seu estudo de vida, visto que nestes estudos todos os valores de desgaste se apresentaram superiores a $0,3\text{mm.}$

Realizar o estudo de usinagem destas ferramentas em comparação a ferramentas cerâmicas comerciais avaliando as mesmas variáveis de saída afim de buscar melhorias quanto a composição das ferramentas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. P. **Estudo da usinabilidade de aços inoxidáveis AISI 316, AISI 410 e UNS S31803**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2020.
- ALVES, U. C. **Avaliação da força de usinagem, superfície e subsuperfície geradas no torneamento da liga Ti-6Al-4V produzida por manufatura aditiva**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Materiais e Processos de Fabricação) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.
- AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2002.
- ARAB, A. *et al.* Effect of MgO addition on the mechanical and dynamic properties of zirconia toughened alumina (ZTA) ceramics. **Materials**, Beijing, v.12, n.5, 2019.
- ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- ASLANTAS, K.; UCUN, I.; ÇICEK, A. Tool life and wear mechanism of coated and uncoated Al₂O₃/TiCN mixed ceramic tools in turning hardened alloy steel. **Wear**, Turquia, v. 274-275, p.442-451, 2011.
- AZHAR, A. A. *et al.* Friction and wear analysis of ceramic cutting tool made from Alumina-Zirconia-Chromia. **Jurnal Tribology**, v. 24, 2020.
- BARCELOS, D. J. **Caracterização tribológica do revestimento ta-C/DLC (carbono tipo diamante/ amorfo tetraédrico não hidrogenado) sobre aço ABNT 52100 em contato e movimento relativo com esfera de Si₃N₄**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- BELINATO, G. *et al.* Response surface methodology applied to a hard-turning process using wiper geometry tool. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICS AND MATERIALS IN DESIGN ALBUFEIRA*, 7., 2017, Portugal. **Proceedings** [...]. Portugal: INEGI/FEUP, 2017.
- BHADESHIA, H. K. D. H. Steels for bearings. **Progress in Materials Science**, v. 57, n. 3, p. 268-435, 2012.
- BOING, D. *et al.* Tool wear rate of the PCBN, mixed ceramic, and coated cemented carbide in the hard turning of the AISI 52100 steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, n. 9, 2019.
- BORGES, G. C. **Análise da relação dos parâmetros de corte com a qualidade superficial e desgaste da ferramenta de metal duro com tripla camada de revestimento no torneamento a seco do aço SAE 4140**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2020.

BOSETTI, P.; BERTOLAZZI, E. Feed-rate and trajectory optimization for CNC machine tools. **Robotics and computer-integrated manufacturing**, v. 30, n. 6, 2014.

CAMPOS, P. H.S. *et al.* Modeling of Life Tool and Roughness in Turning Hard Steel AISI52100 Wiper with Mixed Ceramics Using Response Surface Methodology. **International Conference on Industrial Engineering and Operations Management**, v. 9, n. 11, 2012.

CAMPOS, P. H.S. **Otimização Robusta Multivariada do Processo de Torneamento do Aço Endurecido ABNT 52100 com Ferramenta Cerâmica Alisador**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

DE VOS, P.; STHAL, J. **Metal Cutting Theories in Practice**. Fagersta, Sweden: Seco Tools AB, 2014.

CHINCHANIKAR, S.; CHOUDHURY, S. K. Predictive modeling for flank wear progression of coated carbide tool in turning hardened steel under practical machining conditions. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 76, n. 5-8, p. 1185-1201, 2015.

D'ADDONA, D. M.; RAYKAR, S. J. Analysis of surface roughness in hard turning using wiper insert geometry. **Procedia CIRP**, v. 41, 2016.

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

EVANGELISTA, G. S. *et al.* Efeito do desgaste da ferramenta na rugosidade do aço endurecido ABNT 52100 em um processo de torneamento. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 37., 2018, Maceió. **Proceedings** [...]. Maceió: Enegep, 2018. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_259_487_35433.pdf. Acesso em: 14 nov. 2022.

FRANÇA, E.O. **Usinagem do ferro fundido vermicular com ferramenta de metal duro e cerâmica de $Al_2O_3+Cr_2O_3$ e Al_2O_3+MgO** . 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2020.

FURTADO, A. E. *et al.* Aços hipereutetóides para fabricação de rolamentos automotivos: estudo e caracterização do aço SAE 52100. *In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA*, 26., 2018, São Paulo. **Proceedings** [...]. São Paulo: Blucher, 2018. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/aos-hipereutetides-para-fabricao-de-rolamentos-automotivos-estudo-e-caracterizao-do-ao-sae-52100-28240>. Acesso em: 12 dez. 2022.

GABALDO, S. **Dióxido de carbono como fluido de corte no torneamento de aço inoxidável duplex com ferramentas de metal duro: efeitos na integridade superficial**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019.

GAMA, R. P. **Estudo da formação do cavaco no torneamento de superligas de níquel**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. dos. **Ensaio de materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GEVORKYAN, E. *et al.* Effect of SiC Addition to Al₂O₃ Ceramics Used in Cutting Tools. **Materials**, v.13, n.22, 2020.

GOMES, J. E. M. *et al.* Análise dos esforços de corte no torneamento do aço ABNT 52100. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO*, 9., 2017, Joinville. **Proceedings** [...]. Joinville: Abcm, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319992745_ANALISE_DOS_ESFORCOS_DE_CORTE_NO_TORNEAMENTO_DO_ACO_ENDURECIDO_ABNT_52100. Acesso em: 02 jan. 2023.

GONÇALVES, I. A. *et al.* Study of the influence of cutting fluid amount in steel turning of AISI 52100. **International Journal of Engineering Technologies and Management Research**, v. 5, n.7, 2018.

GROOVER, M. P. **Introduction to manufacturing processes**. 1. ed. New York: Wiley & Sons, 2013.

GOMES, J. E. M. **Estudo do acabamento no torneamento do aço ABNT 52100 endurecido, utilizando o arranjo fatorial completo**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

IGBAL A. *et al.* Modeling the effects of cutting parameters in MQL-employed finish hard-milling process using D-optimal method. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 199 n. 1-3, p. 379–390, 2008.

KREBS, G. **Utilização de insertos de cerâmica no torneamento de desbaste da liga de níquel 625 depositada em forma de revestimento metálico**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Manufatura) - Universidade tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

KHATAI, S. *et al.* On Machining behaviour of various cutting Inserts: A review on hardened steel. **Materials Today: Proceedings**, V. 62, n. 6, P. 3485-3492, 2022.

KONDO, M.Y. *et al.* Optimizing cutting parameters for cutting power and roughness in VAT 32® turning with an experimental Al₂O₃-MgO ceramic tool using Taguchi's method, **Procedia CIRP**, V. 77, P. 610-613, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.200>. Acesso em: 11 jan. 2023.

KONDO, Y. **Análise do processo de torneamento da superliga Vat 32® com ferramentas de corte experimentais e comerciais**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2019.

LEANDRO, G. H. C. R. **Avaliação do comportamento no torneamento do aço SAE 8640 em diferentes condições de lubri-refrigeração**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2020.

LI, J.; LAGHARI, R. A. A review on machining and optimization of particle-reinforced metal matrix composites. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 100, n. 9, 2019.

LI, L.; LI, Y. Development and trend of ceramic cutting tools from the perspective of mechanical processing. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 94, n. 1, 2017.

MACHADO, A. R. *et al.* **Teoria da Usinagem**. 2. ed., São Paulo: Blucher, 2011.

MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2015. *E-book*. ISBN 9788521208440. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521208440/>. Acesso em: 11 jan. 2023.

MACHADO, A. R.; DINIZ A. E. Tool wear analysis in the machining of hardened steels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, n. 9, 2017.

MEDDOUR, I. *et al.* Investigation and modeling of cutting forces and surface roughness when hard turning of AISI 52100 steel with mixed ceramic tool: cutting conditions optimization, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 77, n.5, 2015.

NIU, J., *et al.* Study on surface integrity of compacted graphite iron milled by cemented carbide tools and ceramic tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.103, n.9, 2019.

OGATA, H. T. S. **Determinação da influência das tensões residuais nas propriedades de fadiga em aço SAE 8620 processado com diferentes profundidades de camada de cementação**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

OLIVEIRA, W. P. *et al.* Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo e adesivo do aço ABNT 52100 de um rolo stretch bending revestido com WC-Co e NiCCr aplicados pelo processo HVOF. *In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA*, 10., 2018, Salvador.

Proceedings [...]. Salvador: Conem, 2018. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/326428604_Avaliacao_da_resistencia_ao_desgaste_abrasivo_e_adesivo_do_aco_ABNT_52100_de_um_rola_stretch_bending_revestido_com_WC-Co_e_NiCCr_aplicado_pelo_processo_HVOF. Acesso em: 14 out. 2022.

OSTERGLAVA, N., *et al.* Prediction of surface roughness through roughness parameter Rz, during hard turning of steel C55 (DIN) using mixed ceramics MC2 (Al₂O₃+TiC). **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 12, n. 4, 2021.

PANDA, A. *et al.* Investigation of flank wear in hard turning of AISI 52100 grades steel using multilayer coated carbide and mixed ceramic inserts. **Procedia Manufacturing**, v. 20, p. 365-371, 2018.

PASCHOALINOTO, N. W. *et al.* A utilização de redes neurais artificiais para a predição de acabamento superficial do processo de torneamento do aço endurecido ABNT 52100. *In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA*, 12., 2012, São Luís. **Proceedings** [...]. São Luís: Conem, 2012. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/298605318_A_UTILIZACAO_DE_REDES_NEUR AIS_ARTIFICIAIS_PARA_A_PREDICAO_DE_ACABAMENTO_SUPERFICIAL_DO_PROCESSO_DE_TORNEAMENTO_DO_ACO_ENDURECIDO_ABNT_52100. Acesso em: 05 jan. 2023.

POULACHON, G. *et al.* Wear behavior of CBN tools while turning various hardened steels. **Wear**, v. 256, n. 3-4, p. 303-310, 2003.

REDDY, M. M., SNG, W. S. Temperature and Cutting Force Analysis in Turning of Steel AISI 4140 using Advanced Ceramics tools. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 495, n. 1, 2019.

REVEL, P. *et al.* High precision hard turning of AISI 52100 bearing steel. **Precision Engineering**, v. 43, p. 24-43, 2016.

RIBEIRO, L. A. **Aplicação de ferramentas cerâmicas a base de óxido de alumínio no torneamento da superliga VAT32®**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2020.

RIBEIRO, M. V.; MALÈRE, E. P.; RIBEIRO, J. C. Aplicação de ferramentas cerâmicas no torneamento de cilindros laminadores. *In*: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 4., 2007, Águas de São Pedro. **Anais [...]**. Águas de São Pedro: Cobef, 2007. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/cobef/2007/files/011074218.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2022.

SALACINSKI, T. *et al.* Roughness of metal surface after finishing using ceramic brush tools. **Advances in Materials Science**, v.18, n.1, p. 20-27 2018.

SANTOS, G. A. **Tecnologias mecânicas: materiais, processos e manufatura avançada**. São Paulo: Érica, 2021.

SHABANI, M. *et al.* Mathematical Modeling of the Surface Roughness Parameters Rp and Rv in Hard Turning of Steel C55 (DIN) Using Mixed Ceramics MC 2 (Al₂O₃+ TiC). **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 12, n.3, 2021.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Foundations of materials science and engineering**. 5th ed. Local: McGraw-Hill Companies, 2010.

SIRAJ, S.; DHARMADHIKARI, H. M.; GORE, N. Modeling of roughness value from tribological parameters in hard turning of AISI 52100 steel. **Procedia Manufacturing**, v. 20, p. 344-349, 2018.

SOUSA, T. A. **Usinagem de ferro fundido vermicular com ferramenta de corte a base alumina magnésio**. 2020. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2020.

STEMMER C. R. **Ferramentas de corte I**. 6.ed. Florianópolis: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

STEPAN, G. *et al.* Chatter avoidance in cutting highly flexible workpieces. **CIRP Annals Manufacturing Technology**, Inglaterra, v. 66, n. 1, 2017.

TAMAYO, Y. M. *et al.* Investigação da influência dos parâmetros de corte na rugosidade superficial usando regressão múltipla. **Revista Ibero americana de Ingeniería Mecánica**, v. 20, n. 2, 2016.

TEDESCO, M.E. **Variação dimensional e microestrutural do aço AISI 4140 em peças usinadas por torneamento**. 2007. Dissertação (Mestrado em Materiais) -Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2007.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4th. ed. Melbourn: *Buttherworth-Heinemann*, 2000.

VERESCHAKA, A. A. *et al.* Nano-scale multi-layered coatings for improved efficiency of ceramic cutting tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 90, n. 1-4, 2017.

WRASSE, E. R. **Usinabilidade de liga ferrosa autolubrificante sinterizada**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

YILDIRIM, Ç.V. *et al.* Evaluation of tool wear, surface roughness/topography and chip morphology when machining of Ni-based alloy 625 under MQL, cryogenic cooling and Cry-oMQL. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 2, 2020.

ZHANG, X. P.; WU, S. B. Chip control in the dry machining of hardened AISI 1045 steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.88, n. 9-12, p. 3319-3327, 2017.

ZHU, K.; ZHANG, Y. A cyber-physical production system framework of smart CNC machining monitoring system. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v.23, n.6, 2018.

ZURITA-HURTADO, O. J.; GRACI-TIRALONGO, V. C.; CAPACE-AGUIRRE, M. C. Effect of surface hardness and roughness produced by turning on the torsion mechanical properties of annealed AISI 1020 steel. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia**, v. 84, 2017.

ANEXO I

Ensaio	R _{a1} μm	R _{a2} μm	R _{a3} μm	R _{t1} μm	R _{t2} μm	R _{t3} μm	R _{z1} μm	R _{z2} μm	R _{z3} μm	R _a médio μm	R _a médio μm	R _a médio μm	V _b mm
1	0,357	0,409	0,350	3,223	3,607	2,979	2,610	2,874	2,515	0,372	3,270	2,610	0,599
2	0,257	0,274	0,268	1,666	2,002	2,185	1,484	1,487	1,582	0,266	1,951	1,487	0,532
3	0,346	0,369	0,393	3,571	3,351	3,284	2,698	2,498	2,649	0,369	3,402	2,649	0,653
4	0,687	0,558	0,577	5,072	3,839	3,949	3,547	2,986	3,207	0,612	4,287	3,207	0,569
5	0,638	0,402	0,410	5,347	4,584	3,656	4,360	3,231	3,021	0,483	4,529	3,231	0,700
6	0,438	0,445	0,407	3,546	3,571	3,284	2,858	2,929	2,649	0,430	3,467	2,858	0,708
7	0,294	0,311	0,312	2,185	2,521	2,490	1,854	1,951	2,041	0,306	2,399	1,951	0,586
8	0,342	0,332	0,357	3,150	2,734	2,820	2,404	2,124	2,468	0,344	2,901	2,404	0,611
9	0,455	0,631	0,449	3,552	5,255	3,461	2,866	3,905	2,692	0,512	4,089	2,866	0,581
10	0,465	0,393	0,445	5,090	4,956	5,316	3,305	3,208	3,165	0,434	5,121	3,208	0,599
11	0,560	0,629	0,626	6,470	7,129	5,988	4,391	4,766	4,589	0,605	6,529	4,589	0,582
12	0,594	0,510	0,531	6,085	4,712	6,641	4,141	3,316	3,915	0,545	5,813	3,915	0,569

ANEXO II

Ensaio	R _{a1} μm	R _{a2} μm	R _{a3} μm	R _{t1} μm	R _{t2} μm	R _{t3} μm	R _{z1} μm	R _{z2} μm	R _{z3} μm	R _a médio μm	R _a médio μm	R _a médio μm	V _b mm
13	0,312	0,325	0,319	3,101	3,400	3,113	2,507	2,710	2,638	0,319	3,113	2,638	0,495
14	0,370	0,337	0,360	5,280	3,485	3,125	2,947	2,643	2,478	0,360	3,485	2,643	0,410
15	0,525	0,454	0,476	5,396	3,619	3,473	3,683	2,905	2,943	0,476	3,619	2,943	0,448
16	0,441	0,505	0,526	2,966	3,461	3,327	2,684	3,110	2,927	0,505	3,327	2,927	0,515
17	0,376	0,378	0,417	3,430	3,162	2,887	2,445	2,527	2,546	0,378	3,162	2,527	0,389
18	0,367	0,354	0,363	2,783	2,411	3,009	2,289	2,087	2,349	0,363	2,783	2,289	0,402
19	0,244	0,286	0,306	2,399	2,954	2,747	2,064	2,312	2,399	0,286	2,747	2,312	0,365
20	0,554	0,659	0,553	4,700	4,260	4,358	3,901	3,729	3,690	0,554	4,358	3,729	0,339
21	0,381	0,482	0,561	2,814	5,176	3,497	2,347	3,082	2,965	0,482	3,497	2,965	0,398
22	0,652	0,366	0,376	6,891	3,546	3,455	3,851	2,601	2,774	0,376	3,546	2,774	0,368
23	0,417	0,595	0,427	3,229	5,036	3,668	2,473	3,585	2,584	0,427	3,668	2,584	0,339
24	0,412	0,415	0,417	3,207	3,333	3,259	2,810	2,618	2,500	0,415	3,259	2,618	0,607