

LUIZ FLAVIO CASTRO SILVA

Aplicação de ferramenta cerâmica no torneamento do aço 52100 endurecido

Luiz Flavio Castro Silva

Aplicação de ferramenta cerâmica no torneamento do aço 52100 endurecido

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

Orientador: Manoel Cleber de Sampaio Alves

Coorientador: Marcel Yuzo Kondo

S586a	Silva, Luiz Flávio Castro Aplicação de ferramenta cerâmica no torneamento do aço 52100 endurecido / Luiz Flávio Castro Silva - Guaratinguetá, 2024. 87 f : il. Bibliografia: f. 71-73 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2024. Orientador: Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves Coorientador: Prof. Dr. Marcel Yuzo Kondo 1. Material cerâmico. 2. Ferramentas de corte. 3. Aço de alta resistência. 4. Usinagem. I. Título. CDU 669.3
-------	--

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

LUIZ FLAVIO CASTRO SILVA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
**LUIZ FLAVIO CASTRO SILVA EM NOME DO CURSO DE ENGENHARIA
MECÂNICA**

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

Documento assinado digitalmente
 **MARCELO SAMPAIO MARTINS**
Data: 18/11/2024 17:16:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES**
Data: 19/01/2024 22:16:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

Documento assinado digitalmente
 **EMANUELE SCHNEIDER CALLISAYA**
Data: 19/01/2024 18:18:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Ms. Emanuele Schneider Callisaya
UNESP-FEG

Documento assinado digitalmente
 **MARCEL YUZO KONDO**
Data: 19/01/2024 18:10:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcel Yuzo Kondo
UNESP-FEG

Janeiro, 2024

Dedico este trabalho a minha família, em especial a minhas irmãs e meus primos, que sempre foram meu suporte para seguir na graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me fornecer força para superar os desafios e a capacidade para concluir este trabalho. Expresso minha gratidão à minha família e amigos que estiveram ao meu lado durante toda a graduação, com destaque para minha irmã Natalia Alkmin Castro Silva, meu primo João Estevão Garcia de Castro, e meu colega de trabalho Rafael Umada Cohen, os quais acreditaram em mim e foram um apoio fundamental para não desistir.

Quero expressar meu profundo reconhecimento ao meu orientador e coorientador, Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves e Prof. Dr. Marcel Yuzo Kondo, por me acolherem no projeto, pela orientação dedicada, e pelo constante incentivo. Sem a orientação de vocês, a pesquisa apresentada aqui não teria sido possível. Gostaria também de agradecer à Prof. MSc. Emanuele Schneider Callisaya e aos funcionários e técnicos da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pelo valioso auxílio no desenvolvimento do projeto.

“O importante é não parar de questionar a
curiosidade tem sua própria razão de existir.”

Albert Einstein

RESUMO

Nos processos de usinagem de aços endurecidos, conhecidos como *Hard Turning*, a eliminação da retificação é uma estratégia crucial para aumentar a produtividade e reduzir custos. Este estudo avalia o desempenho de uma ferramenta cerâmica, que apresenta boa resistência ao desgaste e alta dureza, características essenciais para usinar o aço ABNT 52100, amplamente utilizado na fabricação de rolamentos devido ao seu elevado teor de carbono e presença de elementos de liga que conferem alta dureza após o processo de têmpera. O objetivo principal é analisar como essa ferramenta cerâmica se comporta no torneamento do aço 52100 sem o uso de fluido de corte, considerando variáveis como rugosidade, desgaste da ferramenta, potência de usinagem, vibração, emissão acústica e características dos cavacos. Com um arranjo fatorial completo, foram utilizadas duas velocidades de corte (V_c) de 150 e 200 m/min e três valores de avanço (f) de 0,15, 0,2 e 0,25 mm/rot. Os resultados mostram que a velocidade de corte (V_c) tem a maior influência sobre a rugosidade, com um valor médio alcançado de aproximadamente 0,35, o que se aproxima dos níveis obtidos na retificação. Os dados também indicam que a ferramenta cerâmica desenvolvida, utilizada sem refrigeração, pode proporcionar rugosidades comparáveis às obtidas pelo processo de retificação.

PALAVRAS-CHAVE: Ferramenta cerâmica; *Hard Turning*; Rugosidade.

ABSTRACT

In the machining processes of hardened steels, known as Hard Turning, the elimination of grinding is a crucial strategy to increase productivity and reduce costs. This study evaluates the performance of a ceramic tool, which exhibits good wear resistance and high hardness—essential characteristics for machining ABNT 52100 steel, widely used in the manufacture of bearings due to its high carbon content and the presence of alloying elements that confer high hardness after the hardening process. The main objective is to analyze how this ceramic tool performs in the turning of ABNT 52100 steel without the use of cutting fluid, considering variables such as roughness, tool wear, machining power, vibration, acoustic emission, and chip characteristics. Using a full factorial arrangement, two cutting speeds (V_c) of 150 and 200 m/min and three feed values (f) of 0.15, 0.2, and 0.25 mm/rev were employed. The results show that the cutting speed (V_c) has the greatest influence on roughness, with an average value achieved of approximately 0.35, which approaches the levels obtained in grinding. The data also indicate that the developed ceramic tool, used without cooling, can provide roughness comparable to that achieved through the grinding process.

KEYWORDS: Ceramic tool; Hard Turning; Roughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Operações de torneamento e principais operações de usinagem no torno.	17
Figura 2 - Ilustração esquemática de um torno horizontal.	18
Figura 3 – Definição do avanço na usinagem.....	22
Figura 4 – Definição da profundidade de corte e da velocidade de avanço.	22
Figura 5 – Representação das amplitudes e (picos e vales) para cálculo do R_a	24
Figura 6 – Altura máxima do perfil R_z . No gráfico $R_z = Z_p6 + Z_v2$	25
Figura 7 – Altura total do perfil R_t	26
Figura 8 – Operação de corte tridimensional.....	28
Figura 9 – Força de usinagem e suas componentes para o processo de fresamento e de torneamento.	29
Figura 10 – Força de usinagem e suas decomposições no plano de cisalhamento.....	30
Figura 11 – Proporções entre as componentes da força de usinagem para torneamento do aço St 42.11	32
Figura 12 – Mecanismos de formação de cavaco.....	33
Figura 13 – Conceito da formação do cavaco.	34
Figura 14 - Formas de Cavaco.....	35
Figura 15 – Tenacidade da cerâmica à base de Al_2O_3 em função do teor de ZrO_2	40
Figura 16 – Degaste de flanco.	41
Figura 17 – Tipo de desgaste: (a) Desgaste de cratera; (b) Desgaste de entalhe.....	42
Figura 18 – Tipos de avarias: (a) Deformação plástica; (b) Lascamento; (c) Trinca; (d) Quebra.	43
Figura 19 – (a) Aresta postiça de Corte; (b) Detalhe ampliado do topo da APC.	44
Figura 20 - Centro de Torneamento CNC Romi modelo GL 240M.	45
Figura 21 – Dimensões do corpo de prova.	46
Figura 22 – Sensor utilizado para registro da potência.	46
Figura 23 – Sensor piezelétrico, marca Vibro Control, modelo TV100.....	47
Figura 24 – Rugosímetro utilizado no estudo.....	47
Figura 25 – (a) Dimensões da ferramenta de cerâmica desenvolvida; (b) Ferramenta cerâmica desenvolvida.	50
Figura 26 – Região identificada no gráfico com a potência no vazio e o contato efetivo de corte.	51
Figura 27 – Exemplo dos gráficos de emissão acústica, vibração e potência	51

Figura 28 - Gráficos pelo tempo do ensaio 11.....	52
Figura 29 - Gráficos pelo tempo do ensaio 15.....	52
Figura 30 - Microscópio marca Mitutoyo modelo QS-LBZ - <i>Visual Quick Scope</i> série 359. ..	54
Figura 31 - Gráfico dos efeitos principais para emissão acústica média.....	55
Figura 32 - Gráfico das interações para emissão acústica média	56
Figura 33 - Gráfico dos efeitos principais para vibração média.....	57
Figura 34 - Gráfico das interações para vibração média.	58
Figura 35 - Gráfico dos efeitos principais para potência média.	59
Figura 36 - Gráfico das interações para potência média.	59
Figura 37 - Gráfico dos efeitos principais para o desvio aritmético médio do perfil.	61
Figura 38 - Gráfico das interações para o desvio aritmético médio do perfil em avaliação	61
Figura 39 - Gráfico dos efeitos principais para rugosidade R_t	63
Figura 40 - Gráfico das interações para rugosidade R_t	63
Figura 41 - Gráfico dos efeitos principais para rugosidade R_z	65
Figura 42 - Gráfico das interações para rugosidade R_z	65
Figura 43 – Desgaste de flanco encontrados (V_b).	67
Figura 44 – Lascamentos e material aderido encontrados.....	68
Figura 45 – Visualização macro e micro dos cavacos gerados.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço ABNT 52100.....	17
Tabela 2 – Propriedades das principais ferramentas cerâmicas.	39
Tabela 3 – Combinação experimental para os ensaios com a ferramenta cerâmica.....	48
Tabela 4 – Análise de variância para os valores de emissão acústica média.	55
Tabela 5 – Análise de variância para os valores de vibração média.	57
Tabela 6 - Análise de variância para os valores de potência média.	58
Tabela 7 - Análise de variância para os valores do desvio aritmético médio do perfil em avaliação.	60
Tabela 8 - Análise de variância para os valores de rugosidade R_t	62
Tabela 9 - Análise de variância para os valores de rugosidade R_z	64
Tabela 10 – Relação de fotos e seus respectivos parâmetros.	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais grupos de materiais para ferramentas de corte.	38
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivos específicos	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 AÇO ABNT 52100	16
2.2 TORNEAMENTO.....	17
2.2.1 Processo <i>Hard Turning</i>	19
2.2.2 Grandezas no processo de corte.....	20
2.2.2.1 Velocidade de corte.....	20
2.2.2.2 Velocidade de avanço	21
2.2.2.3 Avanço	21
2.2.2.4 Profundidade de corte	21
2.2.3 Rugosidade	23
2.2.3.1 Desvio aritmético médio do perfil em avaliação	23
2.2.3.2 Altura máxima do perfil (R_z).....	25
2.2.3.3 Altura total do perfil (R_t)	25
2.2.4 Emissão acústica no processo de usinagem.....	25
2.2.5 Vibração	27
2.2.6 Forças de usinagem	27
2.2.7 Potência de usinagem	29
2.2.8 Formação de cavaco	31
2.3 FERRAMENTA DE CORTE.....	35
2.3.1 Materiais para ferramentas de corte.....	35
2.3.2 Ferramentas de cerâmicas.....	36
2.3.2.1 Cerâmica à base de Al_2O_3	39
2.3.3 Desgaste de ferramentas de corte	41
2.3.4 Aresta postiça de corte (APC)	43
3 MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 CORPO DE PROVA	45
3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA A COLETA DOS DADOS	45
3.3 ENSAIO DE USINAGEM	47
3.4 TRATAMENTO DO DADOS OBTIDOS.....	50

3.5 ANÁLISE MICROSCÓPICA DA FERRAMENTA	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1 EMISSÃO ACÚSTICA.....	54
4.2 VIBRAÇÃO	56
4.3 POTÊNCIA MÉDIA	58
4.4 RUGOSIDADE	60
4.4.1 Desvio aritmético médio do perfil em avaliação R_a	60
4.4.2 Rugosidade R_t	62
4.4.3 Rugosidade R_z	64
4.5 DESGATE DA FERRAMENTA E CAVACOS OBSERVADOS.....	65
5 CONCLUSÃO.....	69
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	70
REFERÊNCIAS	71
ANEXO A – GRÁFICOS DOS ENSAIOS	74
A.1 ENSAIOS 1 A 3.....	74
A.2 ENSAIOS 4 A 6.....	76
A.3 ENSAIOS 7 A 9.....	78
A.4 ENSAIOS 10 A 12.....	80
A.5 ENSAIOS 13 A 15.....	82
A.6 ENSAIOS 16 A 18.....	84

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a indústria exige cada vez mais o desenvolvimento de novos materiais para aumentar a eficiência dos processos, como é o caso do aço 52100 endurecido. Esse tipo de aço é recomendado para aplicações que requerem alta resistência ao desgaste e dureza elevada, graças ao seu alto teor de cromo e carbono. Por essa razão, é amplamente utilizado em lâminas, utensílios de corte, esferas, pistas e anéis de rolamento, bem como em brocas, punções e ferramentas para extrusão a frio. No entanto, é importante notar que, em temperaturas acima de 150 °C, ele pode perder dureza, o que o torna mais adequado para aplicações a frio. Com seu elevado teor de carbono e cromo, o aço 52100 passa, comumente, pelo processo de têmpera (Amaral, 2023).

Por esse motivo, o processo de usinagem convencional, especialmente o torneamento, encontra limitações para suportar os altos esforços exigidos na usinagem desse tipo de aço. Assim, o processo de *Hard Turning* é geralmente utilizado para a fabricação de peças cilíndricas com aço 52100 endurecido. O *Hard Turning* ou Torneamento Duro é realizado em tornos de alta resistência ou centros de usinagem CNC, utilizando ferramentas de ponto único (Nayak, 2023). Esse processo é amplamente aplicado na usinagem de peças endurecidas com dureza entre 45 e 68 HRC e apresenta diferenças significativas em relação ao torneamento convencional, incluindo os parâmetros de corte, a dureza da peça, as ferramentas de corte e o tipo de máquina utilizado.

Antes da introdução do *Hard Turning*, a usinagem de peças endurecidas era realizada em várias etapas: primeiro, uma pré-usinagem para criar a forma da peça com um sobremetal; em seguida, um tratamento térmico; e, por fim, o processo de retificação para o acabamento das dimensões finais. O *Hard Turning* eliminou a necessidade de retificação, tornando o processo mais eficiente ao permitir a usinagem direta de materiais endurecidos.

Esse processo exige ferramentas de corte avançadas, como as de diamante, CBN (nitreto cúbico de boro) e cerâmicas, que possibilitam a usinagem de peças duras em condições secas (Bartarya, 2011). A introdução desses tipos de insertos no mercado tornou o *Hard Turning* uma alternativa altamente eficaz ao processo de retificação em muitas aplicações (Nayak, 2023).

Com esse contexto, desenvolveu-se uma ferramenta cerâmica à base de óxido de alumínio para testar seu desempenho na usinagem de materiais duros, visando aprimorar o processo de fabricação de peças cilíndricas endurecidas. Essas ferramentas foram dopadas com óxido de alumínio para facilitar o processo de usinagem e melhorar os resultados.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é investigar o desempenho da ferramenta cerâmica composta por óxido de alumínio dopadas com óxido de magnésio e zircônia na usinagem do aço 52100 endurecido.

1.1.1 Objetivos específicos

- Analisar os efeitos dos parâmetros de usinagem (velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de usinagem) no torneamento com a ferramenta cerâmica citada anteriormente;
- Analisar o comportamento da rugosidade (R_a , R_t e R_z) das peças usinadas de aço 52100 endurecido pela ferramenta cerâmica composta por óxido de alumínio dopada com óxido de magnésio e zircônia;
- Verificar a potência consumida, a emissão acústica e a vibração durante o torneamento para as diferentes condições de ensaio;
- Analisar ainda o desgaste e as avarias das ferramentas para as diferentes condições de ensaio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇO ABNT 52100

Introduzido por volta de 1900, o aço ABNT 52100 (ou AISI 52100) é uma liga reconhecida por sua excelente usinabilidade em condições recozidas, destacando-se pela elevada dureza no estado tratado termicamente. Essa composição é comumente utilizada em pistas de mancais e rolamentos, sendo ainda uma escolha predominante (BARCELOS, 2019).

De acordo com Budinsky (2002), o aço ao cromo com alto teor de carbono é geralmente produzido por meio do processo de fusão de indução a vácuo, proporcionando não apenas uma capacidade de carga dinâmica elevada, mas também maior confiabilidade decorrente dos níveis reduzidos de inclusões. Modificações foram introduzidas para atender a requisitos específicos, especialmente em rolamentos de grandes dimensões. Nestes casos, a adição de silício, manganês e molibdênio contribui para melhorar as propriedades do aço.

Ao longo do tempo, a evolução das necessidades do mercado impulsionou o desenvolvimento de aços adaptados para aplicações mais exigentes, incluindo altas velocidades de trabalho, condições operacionais em altas temperaturas e maior resistência à corrosão. Essas inovações visam atender às demandas crescentes por desempenho e durabilidade em diversas aplicações industriais (BARCELOS, 2019).

Além disso, o aço ABNT 52100, é reconhecido por sua elevada temperabilidade, dureza e resistência ao desgaste, e encontra uma aplicação específica, sendo restrito a temperaturas até 150 °C. Nota-se uma diminuição da dureza acima desse limite térmico. Em sua condição beneficiada, apresenta má soldabilidade, mas destaca-se pela alta resistência ao desgaste (PASCHOALINOTO *et al.*, 2012).

Com isso, este aço encontra utilidade em diversas aplicações, como roletes, esferas, pistas de rolamento, rolos de calandra e anéis de rolamento, evidenciando sua versatilidade, conforme indicado por fontes como Gerdau (2023).

Dessa forma, pode ser caracterizado como um aço de construção mecânica com elevado teor de carbono, ligado ao cromo, o ABNT 52100 é especialmente empregado em processos de beneficiamento. O tratamento térmico de têmpera em óleo visa atingir elevada dureza, ressaltando sua adequação para aplicações que demandam propriedades mecânicas robustas (PASCHOALINOTO *et al.*, 2012).

Sabendo dessas informações, segue a tabela 1 que mostra a composição química do aço ABNT 52100.

Tabela 1 - Composição química do aço ABNT 52100

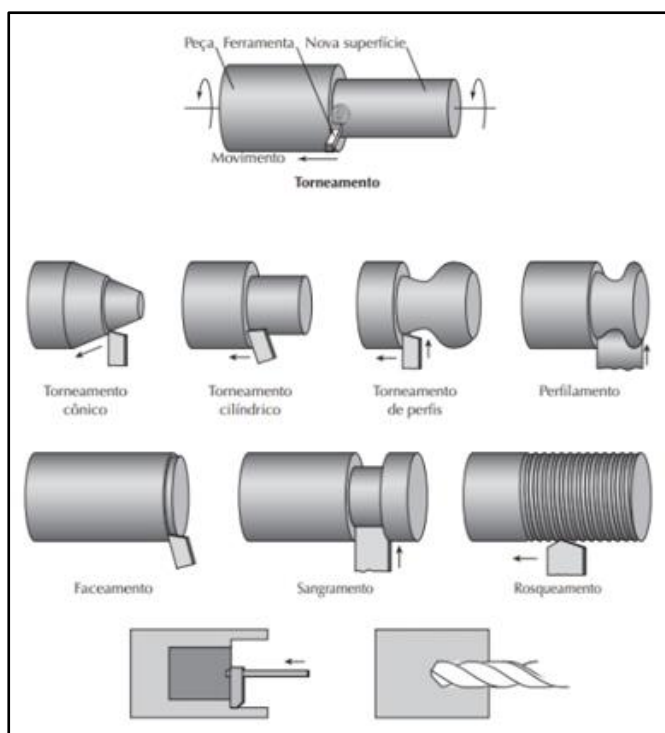
Elemento	% em massa
C	1,025
Mn	0,350
P	0,250
S	0,025
Si	0,275
Cr	1,450

Fonte: Adaptado de GGD (2023)

2.2 TORNEAMENTO

O processo mecânico de usinagem para obtenção de superfícies de revolução envolve a ação da ferramenta em um único ponto para a remoção de material da peça. Esta peça é rotacionada em torno de seu eixo longitudinal a uma velocidade entre 40 e 2.500 rpm, enquanto a ferramenta é conduzida longitudinalmente sobre a superfície da peça. A velocidade de corte varia entre 10 e 1.000 m/min (KIMINAMI, 2013). A Figura 1 ilustra a operação de torneamento.

Figura 1 – Operações de torneamento e principais operações de usinagem no torno.



Fonte: Kiminami (2013).

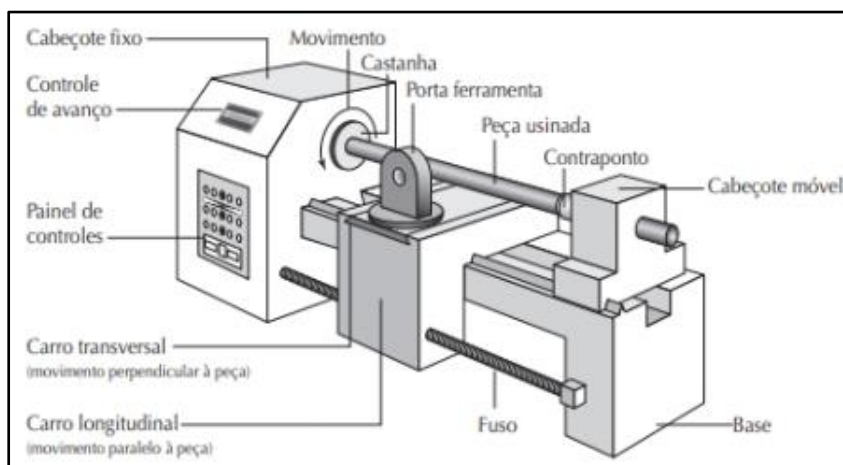
Esse método pode ser aplicado em diversas ligas metálicas e é utilizado para fabricar

componentes e peças com elementos simétricos rotacionais que exigem boa precisão dimensional. As dimensões podem variar desde pequenos parafusos para armações de óculos até pistões, cilindros de laminação e turbinas de hidroelétricas (KIMINAMI, 2013).

Diversas operações de torneamento podem ser realizadas, conforme mostrado na Figura 1. Algumas delas incluem torneamento cônico, rosqueamento, faceamento, torneamento de perfis, perfilamento, sangramento e torneamento cilíndrico.

A máquina responsável por essa operação é chamada de torno, uma máquina ferramenta versátil, operável manualmente e comumente usada em produções de baixa e média escala. A Figura 2 ilustra um torno horizontal mecânico e seus principais componentes, como o cabeçote fixo com unidade motora, eixo da árvore principal e cabeçote móvel.,

Figura 2 - Ilustração esquemática de um torno horizontal.



Fonte: Kiminami (2013).

A ferramenta é colocada no carro porta-ferramentas, localizado no centro do torno, com movimentos longitudinais e transversais. O controle do avanço da ferramenta pode ser manual ou automático. Tornos apresentam diversos acessórios que os tornam versáteis, como placas universais, placas de castanha independente, lunetas fixas e lunetas acompanhadoras, entre outros.

O torno convencional refere-se a máquinas de torneamento horizontal, enquanto os tornos verticais orientam a operação de torneamento e rotação no eixo vertical, mais adequados para peças largas e pesadas. Tornos automáticos, derivados dos mecânicos, permitem operações automáticas, rápidas, precisas e com ferramentas múltiplas. A variável principal no torneamento é a taxa de remoção de material, dependendo do diâmetro, acabamento desejado, tipo de operação e material utilizado (KIMINAMI, 2013).

Determinar a velocidade de corte para minimizar custos é um desafio na otimização de custos do torneamento. Uma estratégia é operar a uma velocidade de corte que forneça a máxima taxa de produção, geralmente em valores elevados de velocidade de corte (KIMINAMI, 2013).

As vantagens do torneamento incluem a produção de peças com boa eficiência, acabamento satisfatório e a capacidade de produzir peças com detalhes superficiais complexos. No entanto, as limitações envolvem a produção de grandes quantidades de cavacos, custos iniciais elevados para aquisição de tornos e custos significativos de ferramentas para máquinas automáticas (KIMINAMI, 2013).

Exemplos de aplicações de usinagem incluem a fabricação de pistões automotivos combinada com fundição, e a produção de engrenagens de caixa de transmissão de veículos em conjunto com forjamento (KIMINAMI, 2013).

2.2.1 Processo *Hard Turning*

Nas indústrias de manufatura, a usinagem desempenha um papel crucial, frequentemente necessário após os processos de conformação, moldagem e fundição. Este processo visa remover material indesejado da peça na forma de cavacos, conferindo a forma, tamanho e acabamento desejados por meio do uso de ferramentas de corte. O torneamento, realizado em máquinas de torno, destaca-se como um dos processos de usinagem, enquanto o torneamento duro ocorre em máquinas de torno robustas ou centros de torneamento CNC, utilizando ferramentas de corte de ponto único. Atualmente, o torneamento duro se destaca como o método mais difundido para usinar peças endurecidas, apresentando uma dureza na faixa de 45 a 68 HRC, e faz uso de ferramentas de corte de ponto único. (NAYAK, 2023)

O torneamento duro se diferencia do torneamento tradicional em diversos aspectos, como a dureza da peça, as condições de corte, a ferramenta de corte e a máquina robusta/CNC empregada. Anteriormente, peças endurecidas eram produzidas por meio de processos de conformação, como fundição, laminação, forjamento, etc. Posteriormente, eram usinadas brutas (em alguns casos, requerendo recozimento) e passavam por tratamento térmico para atingir a dureza desejada, finalizando com o processo de retificação. Em contraste, o torneamento duro elimina a necessidade de usinagem bruta e retificação, permitindo que os materiais sejam fornecidos para o torneamento duro (para endurecimento), conforme ilustrado na Figura 1.

A usinagem de peças endurecidas demanda ferramentas de corte avançadas, tais como diamante, CBN e cerâmicas, para executar o torneamento de peças duras (com dureza superior

a 45 HRC) em condições de corte a seco. (NAYAK, 2023)

Com a introdução de inserções de CBN e cerâmica (revestidas e não revestidas), o torneamento duro surge como uma alternativa eficaz para substituir parcialmente o processo de retificação. Segundo Nayak (2023), conduziram o torneamento duro do aço AISI 4340 utilizando inserções de CBN e observaram que os resultados do acabamento superficial são comparáveis à retificação. Nayak (2023) cita também que, realizaram experimentos de torneamento duro em AISI 52100 com inserções cerâmicas revestidas mistas, notando uma redução significativa nos valores de rugosidade superficial em comparação com as ferramentas não revestidas. No entanto, vários pesquisadores têm se dedicado a conduzir pesquisas em torneamento duro utilizando ferramentas de metal duro revestidas, em vez de optar por ferramentas mais caras, como PCBN e cerâmica, como uma alternativa para reduzir custos. Essa abordagem se tornou possível graças ao desenvolvimento de classes de metal duro, tecnologias de deposição de revestimento e materiais de revestimento. Na atualidade, a usinagem de materiais duros é empregada no processamento de peças endurecidas com uma dureza superior a 45 HRC (faixa de 45 a 69 HRC), ao passo que a usinagem suave se destina ao processamento de peças endurecidas com uma dureza inferior a 45 HRC. (NAYAK, 2023)

Com isso, o torneamento de materiais duros é considerado uma alternativa à retificação, uma vez que proporciona um acabamento de superfície comparável. Vários pesquisadores têm explorado o acabamento de superfície obtido durante o torneamento de materiais duros, abordando diversas durezas e tipos de materiais para comparar os resultados com a retificação. A revisão da literatura indica que o acabamento de superfície é influenciado por vários parâmetros, como avanço, velocidade de corte, profundidade de corte, dureza da peça, material da ferramenta e sua geometria (NAYAK, 2023).

2.2.2 Grandezas no processo de corte

No decorrer do processo de torneamento, algumas grandezas de corte merecem destaque, uma vez que exercem um impacto direto nos custos, no tempo e no acabamento superficial da peça. Essas grandezas incluem:

2.2.2.1 Velocidade de corte

Velocidade de corte (V_c) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, de acordo com a direção e sentido do corte. Em processos que envolvem

movimentos de rotação, a velocidade de corte é calculada pela equação 1, utilizando as unidades mais comuns em usinagem (MACHADO, 2015):

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

V_c = velocidade de corte [m/min];

d = diâmetro da peça ou ferramenta [mm];

n = número de rotações por minuto [rpm].

2.2.2.2 Velocidade de avanço

Velocidade de avanço é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, de acordo com a direção e o sentido do movimento de avanço conforme mostra figura 5 e definida na equação 2 (MACHADO, 2015).

$$V_f = f \cdot n \quad (2)$$

Onde:

V_f = velocidade de avanço [mm/min];

f = avanço [mm/rev];

n = número de rotações por minuto [rpm].

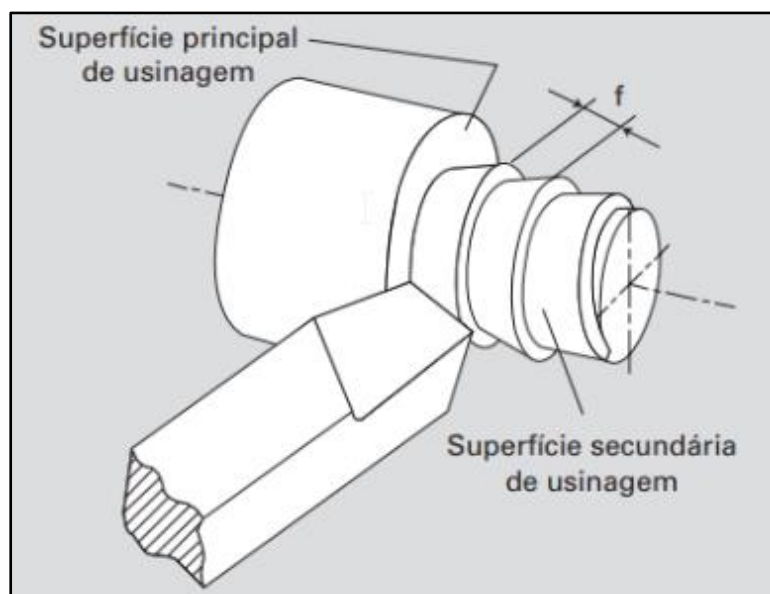
2.2.2.3 Avanço

O avanço (f) refere-se à distância percorrida a cada volta (mm/rev) ou a cada curso da ferramenta (mm/golpe), como mostra a Figura 3 (MACHADO, 2015).

2.2.2.4 Profundidade de corte

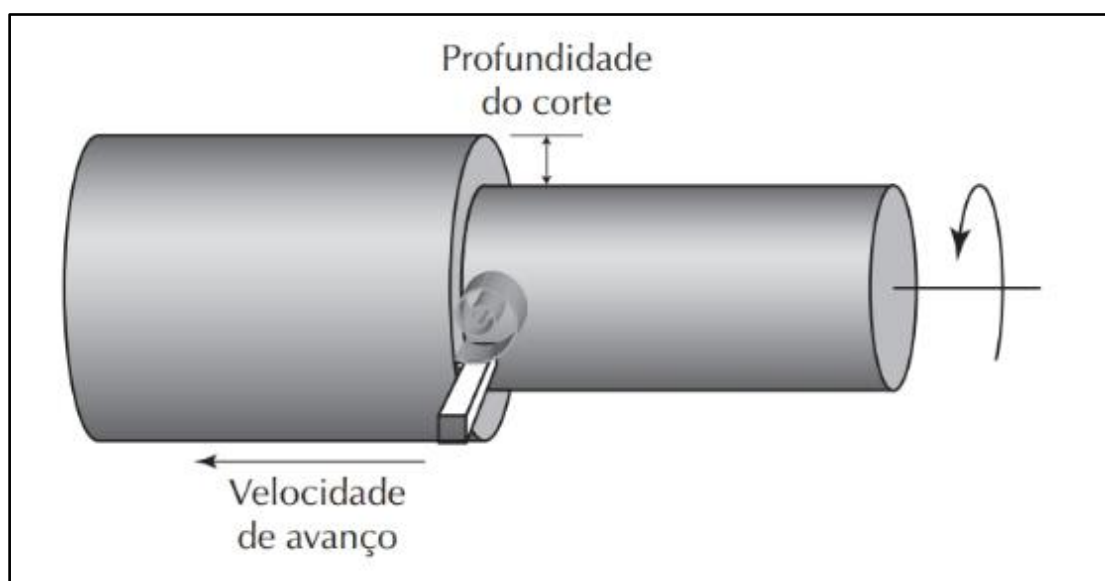
A profundidade ou largura de corte (a_p) é a profundidade ou largura de penetração da ferramenta na peça, medida em uma direção perpendicular ao plano de trabalho, como mostrado na figura 4 (MACHADO, 2015).

Figura 3 – Definição do avanço na usinagem.



Fonte: Machado (2015).

Figura 4 – Definição da profundidade de corte e da velocidade de avanço.



Fonte: Kiminami (2013).

Para validar a possibilidade de substituir o processo de retificação pelo *Hard Turning*, é crucial compreender como certas variáveis influenciam a rugosidade da peça usinada. Segundo Aouici *et al.* (2012), o avanço e a dureza do material são parâmetros estatisticamente significantes na determinação da rugosidade. Em sua pesquisa, o autor obteve os melhores resultados de rugosidade ao empregar um baixo avanço e uma alta velocidade de corte.

Kurt, Yalçın e Yilmaz (2015) também exploraram a relação entre forças de corte, avanço

e velocidade de corte. Seus estudos indicam que as forças de corte e avanço diminuem à medida que a velocidade de corte aumenta. Esse fenômeno é atribuído ao facilitamento do fluxo de cavaco na região de contato entre cavaco e ferramenta com o aumento da velocidade de corte. Além disso, eles observaram que o aumento da profundidade de corte tende a aumentar a força de penetração.

Rao, Rao e Srihari (2013) fornecem insights adicionais, destacando a influência do avanço na força de corte e na rugosidade. Contrariamente, a velocidade de corte não demonstra um efeito significativo nessas respostas. Por sua vez, a profundidade de corte exerce uma influência marcante na força de corte, mas não afeta a rugosidade de maneira expressiva.

Dessa forma, compreender como variáveis como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte impactam a rugosidade torna-se essencial. Esses fatores são fundamentais para respaldar a consideração de substituir o processo de retificação pelo *Hard Turning*, proporcionando uma abordagem mais eficiente.

2.2.3 Rugosidade

Com isso, para entender a rugosidade deve-se considerar que mesmo que as superfícies dos componentes mecânicos pareçam perfeitas à primeira vista, elas carregam consigo a marca do processo de fabricação. Dessa forma, essas superfícies exibem irregularidades, com espaçamento regular ou irregular, que acabam formando um padrão ou textura característicos durante a fabricação. A rugosidade, portanto, representa o conjunto de tais irregularidades nas superfícies, ou seja, são as pequenas saliências e reentrâncias que conferem caráter a uma superfície (LIRA, 2015).

Sabendo disso, para a medição da rugosidade, utiliza-se o rugosímetro que é um dispositivo eletrônico amplamente utilizado na indústria para a avaliação da superfície de peças e ferramentas, como a rugosidade. Ele garante um elevado padrão de qualidade nas medições e é especificamente designado para a análise exclusiva de questões relacionadas à rugosidade de superfícies (LIRA, 2015). Com isso, alguns rugosímetro são responsáveis por fornecerem alguns parâmetros de rugosidade relevantes, como:

2.2.3.1 Desvio aritmético médio do perfil em avaliação

A partir da norma ABNT NBR ISO 4287:2002 diz que o desvio aritmético médio do perfil em avaliação (R_a) é possivelmente o conceito de rugosidade mais antigo ainda em uso,

devido à facilidade de obtenção e cálculo, e é fornecido pela maioria dos rugosímetros, onde pode ser representada pela equação 3 (LIRA, 2015).

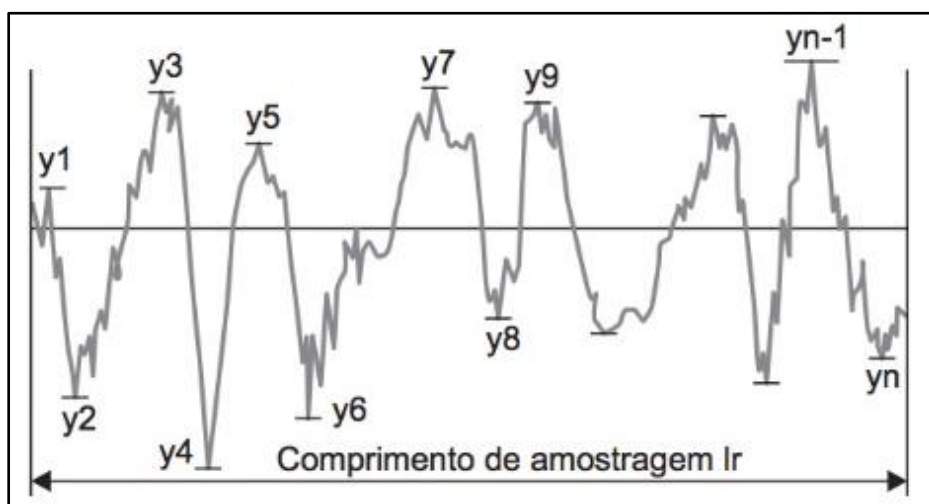
$$Ra = (|y_1| + |y_2| + |y_3| + \dots + |y_n|) / n \quad (3)$$

Onde “ y_1 ”, ..., “ y_n ” são picos e vales no comprimento de amostragem l_r .

Com isso, o desvio aritmético médio do perfil em avaliação (R_a) é, portanto, a distância média de um perfil a partir de sua linha média ao longo de um comprimento medido (l_r). De forma gráfica, o valor de (R_a) corresponde à altura de um retângulo com base (l_r) e área equivalente à soma das áreas delimitadas pela linha média e o perfil de rugosidade. A Figura 5, a seguir, auxilia na visualização desse conceito, ilustrando a relação entre a linha média, o perfil de rugosidade e a altura média calculada.

O desvio aritmético médio do perfil em avaliação é empregado quando se requer um controle contínuo na fabricação e em superfícies onde os sulcos provenientes da usinagem apresentam uma orientação bem definida. Além disso, pode ser utilizada em superfícies com acabamento estético. Entretanto, o desvio aritmético médio do perfil em avaliação possui a desvantagem de não caracterizar a variação dos diversos valores de rugosidade ao longo do perfil analisado. Por ser uma média, picos ou vales atípicos no perfil não afetam significativamente o valor médio. O desvio aritmético médio do perfil em avaliação é expresso em micrometros (μm) (LIRA, 2015).

Figura 5 – Representação das amplitudes e (picos e vales) para cálculo do R_a .

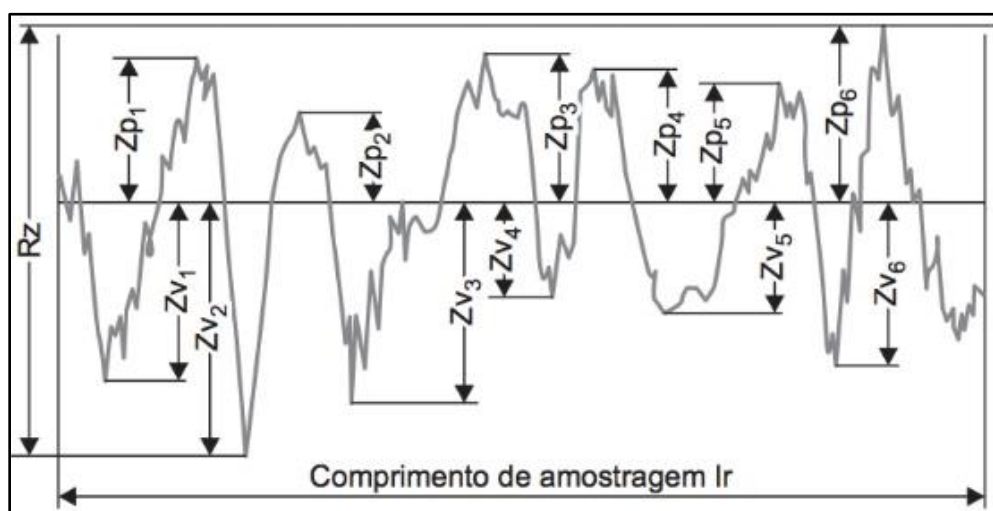


Fonte: Lira (2015).

2.2.3.2 Altura máxima do perfil (R_z)

É a soma da altura máxima dos picos do perfil (Z_p) e da maior profundidade dos vales do perfil (Z_v) no comprimento de amostragem (l_r). Esse parâmetro é aplicável a superfícies com perfil periódico, como peças fresadas (LIRA, 2015). A Figura 6 ilustra esse conceito, mostrando a relação entre os picos, vales e o comprimento de amostragem para facilitar a compreensão.

Figura 6 – Altura máxima do perfil R_z . No gráfico $R_z = Z_{p6} + Z_{v2}$.



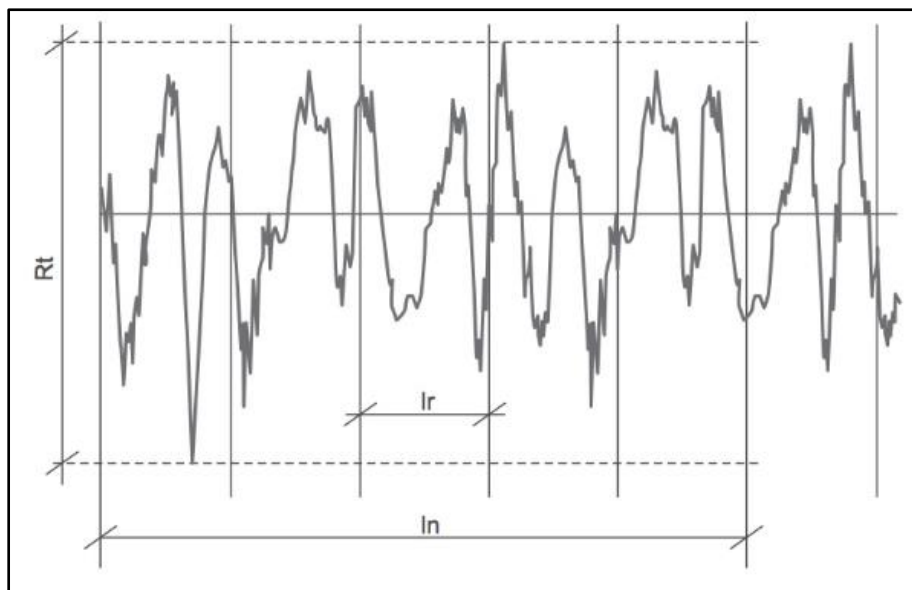
Fonte: Lira (2015).

2.2.3.3 Altura total do perfil (R_t)

É a soma das maiores alturas de pico do perfil (Z_p) e das maiores profundidades dos vales do perfil (Z_v) no comprimento de avaliação (l_n). O parâmetro (R_t) possibilita a criação de um gráfico de superfície, facilitando a interpretação do parâmetro (R_a) com informações complementares. Este parâmetro fornece indicações sobre a deterioração da peça e é amplamente utilizado em superfícies de vedação, assentos de anéis de vedação, tampões, superfícies com carregamento dinâmico, superfícies de deslizamento, entre outros (LIRA, 2015). A Figura 7 a seguir exemplifica este conceito, destacando as áreas de aplicação onde a análise desse parâmetro é crítica para o desempenho da superfície.

2.2.4 Emissão acústica no processo de usinagem

A técnica de emissão acústica, descoberta na Alemanha nos anos 50, representou um avanço significativo no monitoramento de processos industriais.

Figura 7 – Altura total do perfil R_t .

Fonte: Lira (2015).

A pesquisa subsequente abordou amplamente o potencial da emissão acústica para analisar condições de máquinas-ferramenta e processos industriais em geral. Inicialmente, o foco estava nos desafios associados à detecção de desgaste e fratura de ferramentas (SOUSA, 2020).

A emissão acústica, segundo Sousa (2020), tem diversas fontes, como deformações plásticas e elásticas na peça e na ferramenta de corte, atrito, fratura da peça, desgaste e quebra da ferramenta. Se manifesta como ondas de tensão elástica, resultado da liberação de energia durante a deformação de um material sujeito a esforço externo (RIBEIRO, 2020).

França (2020) define a emissão acústica como ondas de tensão elástica com alta amplitude e baixa frequência, geradas por ações dinâmicas sobre os materiais quando expostos a estímulos. Durante a usinagem e formação do cavaco, o atrito entre ferramenta e peça, bem como o contato delimitado, gera energia suficiente para criar ondas de tensão. Essas ondas movem-se da superfície para o centro do material, constituindo um importante indicador das condições de usinagem (RIBEIRO, 2020).

Segundo Ribeiro (2020), a emissão acústica desempenha um papel crucial no monitoramento da usinagem, destacando a importância dos limites de frequência no fenômeno. Embora não haja um consenso universal, a faixa de frequência geralmente varia de 15 a 1200 kHz. Frequências mais elevadas tornam o sinal menos sensível aos ruídos provenientes das máquinas-ferramenta, contribuindo para uma avaliação mais precisa dos processos envolvidos.

2.2.5 Vibração

Medir as vibrações durante a usinagem é uma prática essencial para compreender o comportamento dinâmico do processo. Transdutores piezelétricos do tipo acelerômetro, com saída em volts, são comumente utilizados para essa finalidade, especialmente quando a aquisição de sinais ocorre na faixa de frequência de 1 a 20 kHz (FRANÇA, 2020).

Durante a usinagem, a ocorrência de vibração resulta da falta de amortecimento adequado na rigidez da máquina, no suporte da ferramenta de corte e na fixação da peça de trabalho. Esses fatores podem desencadear interferências na rugosidade, afetar a precisão das medidas, causar desgaste prematuro e gerar ruídos indesejáveis. A avaliação da vibração é crucial para analisar precisamente o processo e evitar vibrações indesejáveis durante o corte (STEPAN *et al.*, 2017).

A vibração na usinagem é originada pela dinâmica do processo de corte que ressoa com a estrutura ao seu redor. Se o amortecimento for insuficiente, podem surgir efeitos indesejados, como ondulações na superfície da peça usinada e aumento do desgaste da ferramenta. Em condições estáveis, um sistema dinâmico dessa magnitude pode gerar movimentos além do esperado com base nos valores nominais das forças de corte. A ferramenta de corte e a peça em usinagem podem experimentar vibrações decorrentes da variação das forças de contato entre os componentes do sistema, seja devido à variação da resistência ao corte ou aos parâmetros de corte (RIBEIRO, 2020).

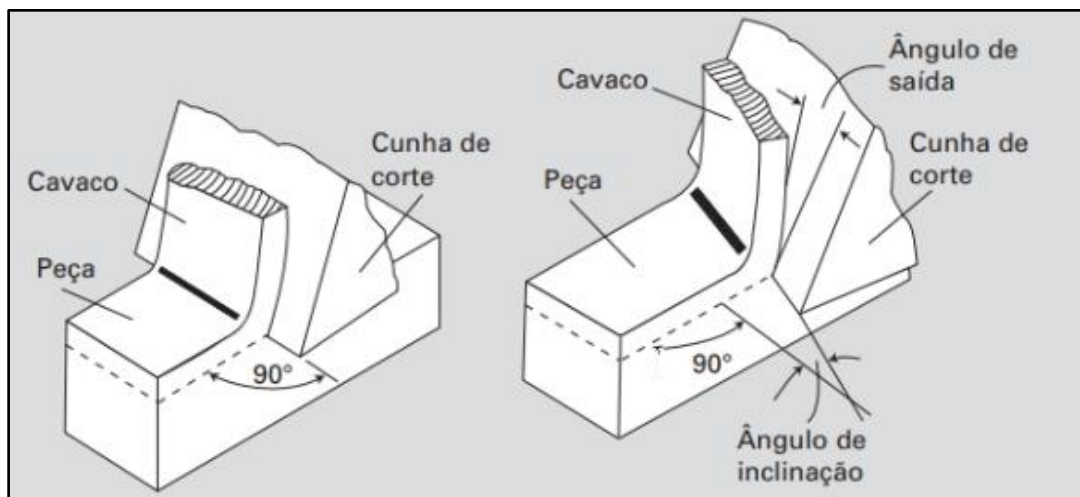
Deformações plásticas e atritos entre o cavaco, a ferramenta de corte e a peça durante a usinagem geram vibrações. Essas vibrações, consideradas movimentos ondulatórios, ocorrem devido ao tempo de corte e ao desgaste da ferramenta. No contexto do sistema, as vibrações podem ser definidas como forças livres, enquanto as vibrações autoexcitadas estão intrinsicamente ligadas a processos de manufatura, como retificação, fresamento e torneamento. O termo "autoexcitada" refere-se ao movimento gerado pela atuação da ferramenta de corte sobre a peça durante a usinagem (SOUSA, 2020).

2.2.6 Forças de usinagem

O entendimento da força de usinagem que incide sobre a cunha cortante e a análise de suas componentes vetoriais são cruciais, pois possibilitam a estimativa da potência necessária para o corte. Além disso, proporcionam insights sobre as forças que atuam nos componentes da máquina-ferramenta e estão diretamente relacionadas ao desgaste das ferramentas de corte, o que influencia a viabilidade econômica do processo. A formação dos cavacos nos

procedimentos de usinagem geralmente ocorre tridimensionalmente (MACHADO, 2015), conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Operação de corte tridimensional



Fonte: Machado (2015).

Devido à sua localização no espaço tridimensional, a força de usinagem (F_U) apresenta três componentes fundamentais que incidem diretamente sobre a cunha cortante e, por conseguinte, sobre a estrutura da máquina-ferramenta. Na Figura 9, são representadas a força de usinagem tridimensional e suas componentes para os processos de torneamento e fresamento.

Os três elementos fundamentais que compõem a força de usinagem são:

Força de corte, também conhecida como força principal de corte (F_c): representa a componente da força de usinagem atuando diretamente na direção do corte, determinada pela velocidade de corte.

Força de avanço (F_f): corresponde à projeção da força de usinagem no plano de trabalho, seguindo a direção do avanço, influenciada pela velocidade de avanço.

Força passiva ou força de profundidade (F_p): constitui a projeção da força de usinagem que age perpendicularmente ao plano de trabalho.

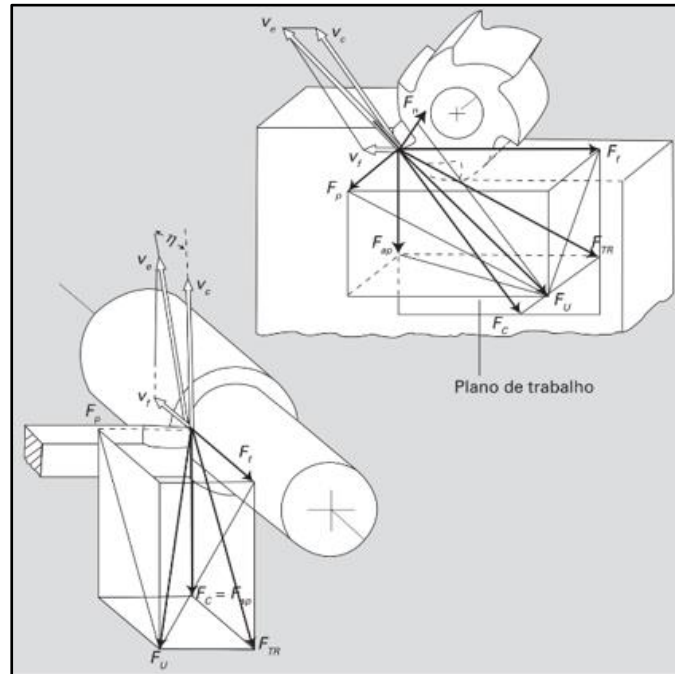
Além dos elementos fundamentais, há outros três componentes relevantes:

Força ativa (F_{TR}): representa a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho.

Força de compressão (F_n): corresponde à projeção da força de usinagem em uma direção perpendicular à superfície principal de corte.

Força de apoio (F_{ap}): é a projeção da força de usinagem em uma direção perpendicular à direção de avanço, localizada no plano de trabalho.

Figura 9 – Força de usinagem e suas componentes para o processo de fresamento e de torneamento.



Fonte: Machado (2015).

A decomposição típica da força de usinagem nos seus três principais componentes mantém a seguinte relação, conforme mostra a equação 4:

$$F_U = \sqrt{F_{ap}^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (4)$$

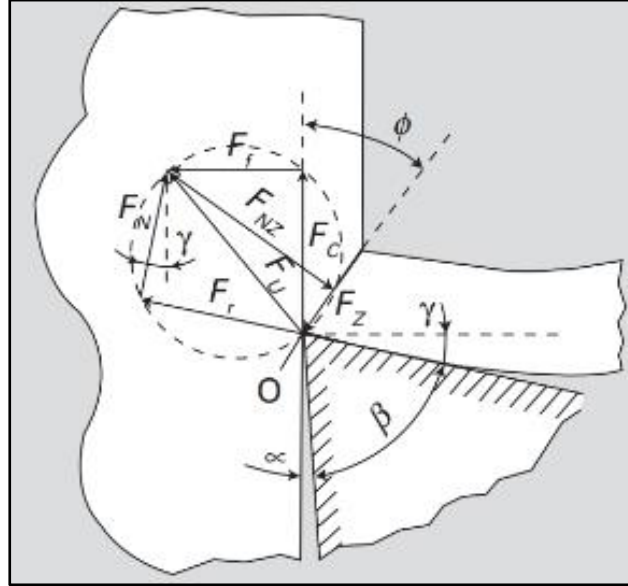
Para facilitar a compreensão das forças de corte na cunha cortante, podemos adotar o modelo de corte ortogonal. Nesse modelo, todos os componentes operam em um único plano, conhecido como o plano de trabalho. A abordagem bidimensional da formação de cavacos possibilita uma análise vetorial das forças que atuam nas partes envolvidas, incluindo a ferramenta, o cavaco e a peça. A Figura 10 apresenta de maneira ilustrativa a força de usinagem (\$F_U\$) atuando sobre a cunha cortante e sua decomposição em diversas direções.

2.2.7 Potência de usinagem

A potência de usinagem é o resultado da combinação das potências necessárias para cada componente da força de usinagem, além do produto entre a velocidade, a força e o cosseno do

ângulo formado entre elas.

Figura 10 – Força de usinagem e suas decomposições no plano de cisalhamento.



Fonte: Machado (2015).

Nesse contexto, apenas os componentes de corte e avanço desempenham um papel significativo na contribuição para a energia de usinagem (MACHADO, 2015). A expressão para a potência é dada pela equação 5.

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{6,0 \times 10^4} \quad (5)$$

As unidades da equação 5 são convencionalmente utilizadas na área de usinagem, onde a força de corte é expressa em [N] e a velocidade de corte em [m/min]. De forma similar, a potência de avanço é expressa pela equação 6:

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

A unidade comum em usinagem para a velocidade de avanço é [mm/min]. Quando a potência precisa ser expressa em [CV], os valores obtidos acima são divididos por 0,735.

A potência do motor de acionamento é determinada em cada caso pela potência resultante das equações 7 e 8. Em seguida, divide-se pelo rendimento dos sistemas de transmissão entre os eixos dos motores e dos sistemas finais de entrega de potência na ferramenta ou no carro de

avanço da máquina-ferramenta. Portanto, tem-se:

$$P_{mc} = \frac{P_c}{\eta_c} \quad (7)$$

$$P_{mf} = \frac{P_f}{\eta_f} \quad (8)$$

Onde P_{mc} [kW] e P_{mf} [kW] são as potências dos motores de acionamento do eixo-árvore e do sistema de avanço, respectivamente. Da mesma forma, η_c e η_f são os valores das eficiências dos sistemas de transmissão do eixo-árvore e do sistema de avanço, respectivamente.

Para sistemas de transmissão com engrenagens ou correias, pode-se adotar $\eta = 0,65$ a $0,85$, e para sistemas com motor acoplado, $\eta = 0,80$ a $0,85$. Em máquinas-ferramentas em que um único motor é utilizado, as potências obtidas são somadas para o dimensionamento ou seleção da máquina adequada.

É importante observar que os valores de potência obtidos para os motores de acionamento na direção do avanço são geralmente bem menores do que na direção de corte, ou seja, no eixo-árvore das máquinas. Isso ocorre porque as forças de avanço são, na maioria das vezes, muito menores do que as de corte e, para condições de corte usuais, as velocidades de avanço são cerca de mil vezes menores do que as de corte. Na multiplicação de força por velocidade, os valores para a potência de avanço resultam muito menores do que os valores para a potência de corte e, na maioria dos casos de seleção de máquina, são desprezados (MACHADO, 2015). Para ilustrar as relações entre os componentes da força de usinagem, a figura 11 apresenta um gráfico com a medição das três componentes.

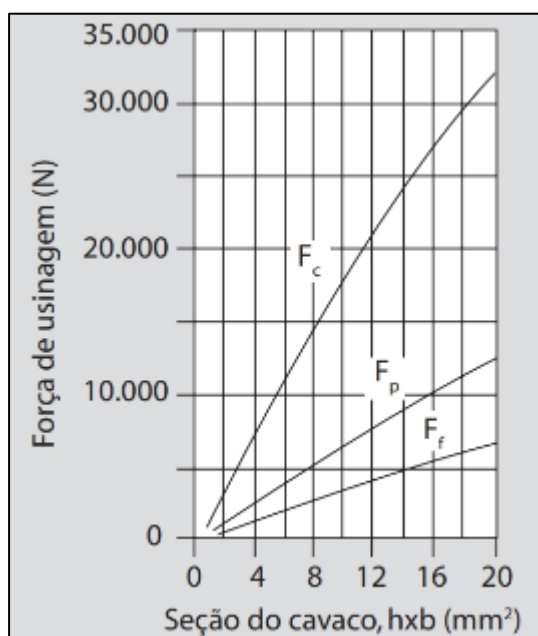
2.2.8 Formação de cavaco

A compreensão aprimorada de todos os processos de usinagem tem sua base no estudo científico da formação de cavacos. Este estudo não apenas impulsionou avanços significativos nos processos de usinagem, mas também contribuiu para o refinamento das arestas de corte, resultando em quebra-cavacos cada vez mais eficientes. Além disso, proporcionou o desenvolvimento de materiais para ferramentas mais modernos e eficazes, permitindo a usinagem de uma variedade mais ampla de materiais.

É conhecido que o cavaco se forma em velocidades extremamente elevadas de deformação, seguidas pela ruptura do material da peça (MACHADO, 2015). Para uma análise

mais aprofundada, o processo é dividido em quatro eventos:

Figura 11 – Proporções entre as componentes da força de usinagem para torneamento do aço St 42.11



Fonte: Machado (2015).

Recalque inicial: decorrente da inserção da cunha cortante no material da peça, uma pequena porção desse material (ainda conectada à peça) é comprimida contra a superfície de saída da ferramenta.

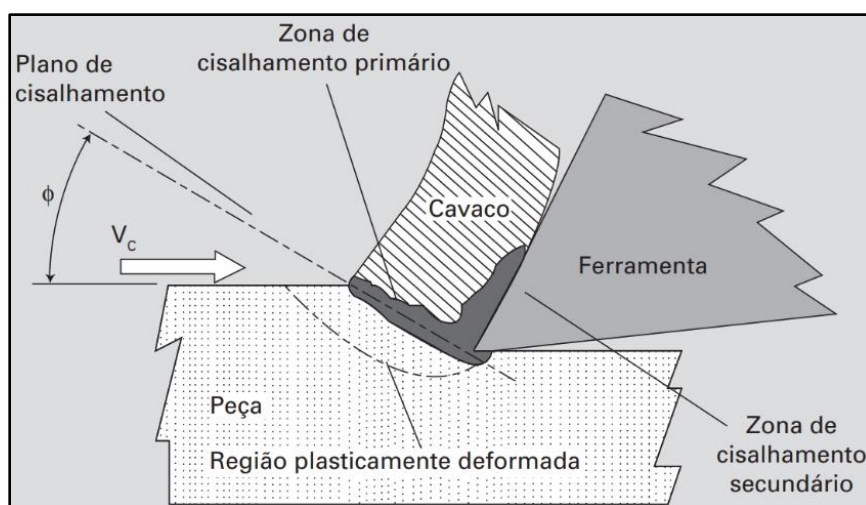
Deformação e fratura: o material comprimido sofre inicialmente uma deformação elástica, seguida por uma deformação plástica, que aumenta gradualmente até que o estado de tensão resulte na fratura. A fratura ocorre predominantemente por cisalhamento, embora exista um estado de tensão que combina forças de compressão/tração e cisalhamento, levando o material à fratura de acordo com seu critério intrínseco de natureza frágil ou dúctil. Uma trinca se forma e se propaga seguindo um critério de propagação de trincas específico para cada material, caracterizando a fratura. Como a formação do cavaco ocorre dinamicamente, há planos instantâneos de fratura e propagação de trincas que definirão uma região entre a peça e o cavaco, conhecida como “zona primária de cisalhamento”. Para simplificar o tratamento matemático da formação do cavaco, modelos simples consideram essa região como sendo apenas um plano abstrato, ou seja, “o plano de cisalhamento”, no qual a fratura se concentra preferencialmente. A figura 12 esquematiza esse plano ou zona de cisalhamento primário, definido pelo ângulo de cisalhamento ϕ , formado entre o plano de cisalhamento e a direção da

velocidade de corte (V_c).

Deslizamento das lâminas: à medida que a ferramenta avança na peça, ocorrerá uma ruptura parcial ou completa na região de cisalhamento, dependendo da extensão da propagação da trinca. As propriedades do material e as condições de avanço e velocidade de corte determinarão por quanto tempo o segmento de material rompido permanecerá unido ao cavaco recém-formado, resultando em cavacos contínuos ou descontínuos, conforme a extensão e a resistência da união entre as lâminas de material rompido.

Saída do cavaco: devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um deslizamento da porção de material deformado e rompido (o cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Durante esse evento, uma nova lâmina de material (imediatamente adjacente à porção anterior) está se formando e passando pelos mesmos processos. Essa nova porção de material também deslizará sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo o fenômeno mais uma vez.

Figura 12 – Mecanismos de formação de cavaco.



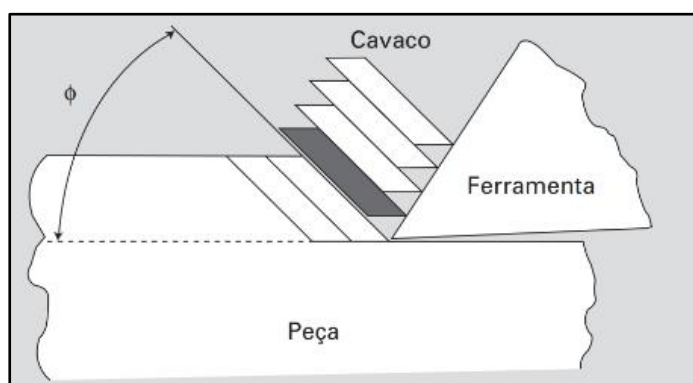
Fonte: Machado (2015).

O deslizamento sobre a superfície de saída não segue necessariamente o Modelo de Coulomb, uma vez que as tensões normais, a velocidade relativa entre as superfícies e, geralmente, a temperatura são muito elevadas. Isso resulta na formação de uma região chamada “zona de cisalhamento secundário” (MACHADO, 2015).

Portanto, o fenômeno da formação do cavaco, nas condições normais de operação, é periódico, uma vez que as fases de recalque, deformação plástica, ruptura, deslizamento e saída do cavaco se repetem ciclicamente para cada pequena lamela de material a ser removida. Essa periodicidade do fenômeno gera excitações dinâmicas na ferramenta de corte, comprovadas

experimentalmente por meio de filmagens ou pela observação da frequência e amplitude da força de usinagem. As primeiras observações do mecanismo de formação de cavacos permitiram a idealização de um modelo simplificado, comparando as lamelas a um “baralho de cartas” (MACHADO, 2015). A Figura 13 a seguir ilustra esse conceito, facilitando a visualização da formação dos cavacos e o comportamento dinâmico observado no processo de usinagem.

Figura 13 – Conceito da formação do cavaco.



Fonte: Machado (2015).

Com isso, a operação de usinagem resulta na criação de uma nova superfície na peça, alcançada pela remoção de material na forma de cavacos. Morfologicamente, os cavacos podem se apresentar como contínuos, descontínuos e segmentados. Geralmente, cavacos contínuos são observados ao usinar materiais dúcteis, enquanto cavacos descontínuos surgem quando há a formação de um fluxo de elementos de cavacos quebrados durante a usinagem de materiais frágeis. A produção de cavacos curtos oferece diversas vantagens. A quebra do cavaco pode ocorrer naturalmente durante sua formação, como no caso da usinagem de bronze e ferro fundido, ou pode ser induzida por dispositivos quebra-cavacos. Em uma classificação mais detalhada, os tipos de cavacos incluem contínuo, parcialmente contínuo, descontínuo e segmentado. Além disso, a ISO 3685 classifica a forma dos cavacos em diferentes categorias, como mostrado na figura 14.

No contexto do estudo realizado, é relevante destacar a presença de cavacos descontínuos, especialmente propensos a ocorrer durante a usinagem de materiais mais frágeis, porém, de maior dureza, como é o caso do aço 52100. Durante o processo de usinagem desse material, os cavacos podem aparentar uma forma mais contínua devido à elevada temperatura envolvida, resultando na fusão temporária das lamelas (MACHADO, 2015). No entanto, é essencial notar que, apesar dessa aparência contínua, os cavacos permanecem descontínuos em sua natureza

intrínseca. Isso significa que, mesmo que possam parecer contínuos devido à junção das lamelas, os cavacos permanecem extremamente frágeis. Qualquer esforço, como tração, torção, compressão, entre outros, pode provocar a ruptura do cavaco, evidenciando sua verdadeira natureza descontínua.

Figura 14 - Formas de Cavaco

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

Fonte: ISO 3685 (1993).

2.3 FERRAMENTA DE CORTE

2.3.1 Materiais para ferramentas de corte

O processo de usinagem é fundamentado na remoção de material, empregando ferramentas feitas de materiais mais duros e mecanicamente resistentes em comparação com a peça. Considerando a premissa da dureza relativa, o surgimento de novos materiais e ligas estruturais com notáveis propriedades de resistência mecânica e alta dureza contribuiu para o desenvolvimento de novos materiais para a fabricação de ferramentas mais robustas destinadas às operações de usinagem. No entanto, a usinagem de materiais frágeis ou em operações de corte interrompido (como no caso do fresamento, por exemplo) demanda materiais que possuam tenacidade suficiente para suportar os choques e impactos inerentes ao processo de usinagem (MACHADO, 2015).

Uma vez que, em geral, dureza e tenacidade são duas propriedades distintas (normalmente, alta dureza está associada a baixa tenacidade e vice-versa), o equilíbrio dessas

propriedades nos materiais das ferramentas de corte tornou-se um desafio para os fabricantes. A conciliação dessas características foi alcançada por meio da produção de ferramentas com diferentes composições químicas, refinamento de grãos, controle dos processos de fabricação e tratamento térmico. Esses procedimentos conferem às ferramentas graus compatíveis de pureza e qualidade (MACHADO, 2015).

Segundo Machado (2015), as características essenciais procuradas em um material para ferramenta de corte incluem:

- Elevada dureza;
- Tenacidade adequada para prevenir falhas por fratura;
- Grande resistência ao desgaste abrasivo;
- Forte resistência à compressão;
- Elevada resistência ao cisalhamento;
- Boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas;
- Alta resistência ao choque térmico;
- Grande resistência ao impacto;
- Possuir inércia química

Essas características não necessariamente coexistem em um único material, mas, dependendo da aplicação, algumas delas são priorizadas e podem ser combinadas. Desde as primeiras aplicações de processos de usinagem, surgiram diversos materiais destinados a ferramentas de corte. Os principais grupos de materiais de ferramentas são apresentados no quadro 2. Eles estão organizados em uma ordem aproximada de surgimento e seguem uma ordem crescente de resistência ao desgaste (ou dureza), o que implica em uma ordem inversa de aumento de tenacidade.

2.3.2 Ferramentas de cerâmicas

Apesar das vantagens e desvantagens dos materiais mencionados anteriormente, este trabalho concentra-se nas ferramentas cerâmicas, as quais foram selecionadas como o material para a ferramenta desenvolvida pela faculdade. Sabendo disso, na literatura, não existe uma definição clássica que identifique prontamente o grupo de materiais cerâmicos. Frequentemente, as cerâmicas são reconhecidas mais pelas suas propriedades do que por uma definição precisa. A explicação a seguir busca integrar pontos comuns que identificam as cerâmicas, conforme apresentado por diversos autores e livros (MACHADO, 2015).

Os materiais cerâmicos são constituídos por elementos metálicos e não metálicos, geralmente presentes na forma de óxidos, carbonetos ou nitretos. Em sua maioria, esses materiais apresentam uma estrutura cristalina. No entanto, diferentemente dos metais, as ligações entre os elementos são predominantemente iônicas ou covalentes (MACHADO, 2015).

Em linhas gerais, as cerâmicas exibem as seguintes propriedades distintivas:

- São materiais refratários, capazes de suportar elevadas temperaturas sem perder resistência mecânica;

- Demonstram alta resistência ao desgaste em operações de usinagem;
- Possuem características frágeis;
- Apresentam baixa condutividade térmica;
- Exibem boa estabilidade química e térmica;
- Demonstram boa resistência à fluência;
- Possuem elevada resistência à compressão e baixa resistência à tração.

Embora haja referências ao uso de cerâmicas como ferramentas de corte desde o início do século XX, foi somente no final dos anos 1950 que insertos à base de alumina (Al_2O_3) entraram no mercado, consolidando-se como um grupo altamente competitivo, especialmente na usinagem de materiais endurecidos e superligas. Essas ferramentas cerâmicas são empregadas em situações que demandam alta dureza e resistência ao desgaste. As cerâmicas de alumina, por exemplo, demonstram excelente inércia química ao usinar materiais ferrosos.

No entanto, devido à falta de tenacidade, o uso de quebra-cavacos integrais torna-se proibitivo, limitando sua aplicação em aços-carbono e de baixa liga. Em contrapartida, para aços de alta dureza, acima de 45 HRC, as cerâmicas são amplamente utilizadas, principalmente em operações de corte contínuo. Contudo, ainda existem desafios significativos no corte interrompido, exceto em casos específicos, como o fresamento de ferro fundido cinzento, no qual cerâmicas à base de nitreto de silício têm demonstrado eficácia (MACHADO, 2015).

No passado, a aplicação das cerâmicas era limitada pela fragilidade que caracterizava esses materiais. Contudo, a introdução no mercado de cerâmicas mistas, cerâmicas reforçadas com SiC (*whiskers*) e cerâmicas à base de nitreto de silício abriu novas possibilidades, inclusive para operações de corte interrompido, como no fresamento de ferros fundidos cinzentos em altíssimas velocidades e com avanços elevados. Esse avanço é possível devido ao aumento significativo na tenacidade alcançado por essas pastilhas em comparação com materiais cerâmicos puros (MACHADO, 2015).

O surgimento desses materiais, juntamente com metais duros revestidos e materiais de

ferramentas ultraduros (PCD e PcBN), marca a década de 1980 como o terceiro grande impulso nas tecnologias de ferramentas de corte, sucedendo os aços rápidos como o primeiro e os metais duros como o segundo (MACHADO, 2015).

Quadro 1 - Principais grupos de materiais para ferramentas de corte.

1. Aço-carbono		
• Comum		
• Com elementos de liga (V, Cr)		
2. Aço semirrápido (baixo W)		
3. Aço rápido (pode ser fundido ou fabricado pela metalurgia do pó)		
• Sem revestimento		
• Com revestimento		
4. Aço super-rápido (elevado teor de V)		
5. Ligas fundidas		
6. Metal duro (pode ser com ou sem revestimento)		
Classes:		
• P		
• M		
• K		
• N		
• S		
• H		
7. Cermets (podem ser com ou sem revestimento)		
8. Cerâmicas		
• Com e sem revestimento		
• À base de Si_3N_4		
• À base de Al_2O_3		
• Pura		
• Com adições		
• ZrO_2 (branca)		
• TiC (preta ou mista)		
• SiC (<i>whiskers</i>)		
9. Ultraduros		
• CBN – PCBN		
• PCD		
10. Diamante natural		

Fonte: Machado (2015).

Sabendo disso, a tabela 2 destaca as propriedades essenciais das principais ferramentas cerâmicas, informações frequentemente encontradas na literatura especializada.

Com isso, as ferramentas cerâmicas podem ser divididas em dois grandes grupos que são as cerâmicas à base de Al_2O_3 e à base de Si_3N_4 . Como visto, o foco desse trabalho foi nas ferramentas à base de alumina, uma vez que foi o material selecionado pela faculdade para o

desenvolvimento da ferramenta.

Tabela 2 – Propriedades das principais ferramentas cerâmicas.

Material	Módulo de elasticidade (GPa)	Dureza (GPa)	Tenacidade K_{IC} (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
Si ₃ N ₄ /SIALON	300	15,6	6,5	3,1	9,7
SiC/WHISKER	390	18,5	8,0	6,4	32,0

Fonte: Machado (2015).

2.3.2.1 Cerâmica à base de Al₂O₃

As ferramentas cerâmicas puras são essencialmente compostas por finos obtidos por metalurgia do pó, adicionando-se MgO para inibir o crescimento dos grãos. Em alguns casos, outros elementos como óxido de cromo, titânio e níquel são incorporados para aumentar a resistência mecânica

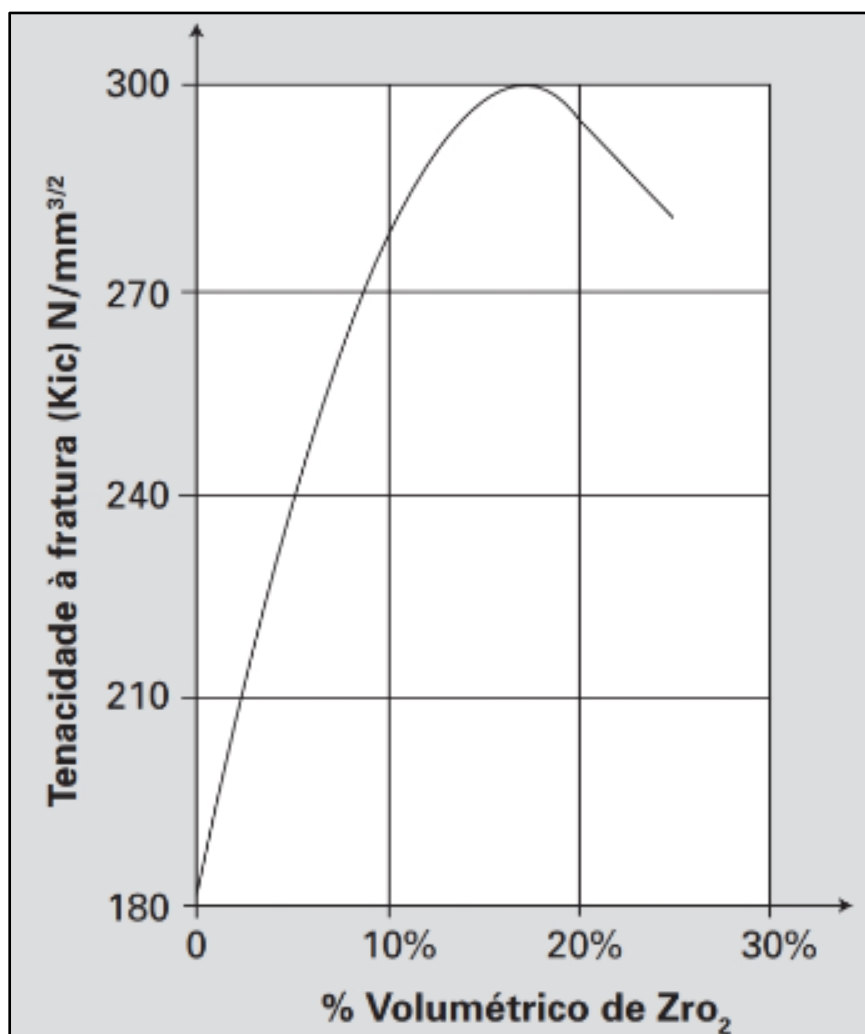
Embora essas ferramentas apresentem elevada dureza, resistência ao desgaste e excelente estabilidade química, sua tenacidade é relativamente baixa. Geralmente empregadas no acabamento de materiais fundidos e em aços temperados superficial ou totalmente, sua utilização demanda máquinas com alta rigidez e isentas de vibrações (MACHADO, 2015).

A introdução de adições nas ferramentas cerâmicas ocorreu nos anos 1970, com percentuais significativos (podendo chegar a 30%) de ZrO₂ e/ou TiC, e eventualmente TiN, TiO₂ e WC. Essas adições conferem à matriz de Al₂O₃ uma maior tenacidade, proporcionando melhores propriedades térmicas para suportar impactos mecânicos e choques térmicos, situações inerentes a certos processos de corte. Uma ferramenta de Al₂O₃ pura possui um coeficiente de tenacidade à fratura K_{IC} de 180 N/mm^{3/2}, e a adição de zircônia (ZrO₂ com 17% de ZrO₂) pode elevar esse valor para 300 N/mm^{3/2} (MACHADO, 2015), conforme ilustrado na figura 15.

A incorporação de TiC (cerâmica mista ou preta) não apenas melhora sutilmente a tenacidade e a condutividade térmica, mas também aumenta significativamente a dureza e a

resistência ao desgaste da ferramenta. Esses insertos têm proporcionado resultados excelentes no desbaste e acabamento de aços laminados, com velocidades de três a seis vezes superiores às do metal duro. Além disso, demonstram desempenho notável no acabamento e superacabamento em operações de fresamento de materiais fundidos e no torneamento de aços duros (MACHADO, 2015).

Figura 15 – Tenacidade da cerâmica à base de Al_2O_3 em função do teor de ZrO_2 .



Fonte: Machado (2015).

Outra inovação introduzida no mercado na década de 1980 e bem recebida é a ferramenta cerâmica, também à base de Al_2O_3 , reforçada com SiC (*whiskers*). Esses carbonetos, adicionados em até 20% à alumina na forma de cilindros com diâmetros de 0,5 μm a 6 μm e comprimentos de 10 μm a 80 μm , contribuem significativamente para aumentar a tenacidade. Durante a propagação de uma trinca, os SiC , mesmo permanecendo íntegros, se separam da matriz de Al_2O_3 , absorvendo considerável energia de quebra e inibindo a propagação da trinca.

Isso ocorre devido à resistência dos *whiskers*, que não se quebram, forçando a trinca a desviar-se, consumindo mais energia. Essas ferramentas também exibem maior resistência ao choque térmico devido à maior condutividade térmica do SiC em comparação com a alumina. Suas propriedades são consideradas excepcionais, sendo aplicadas na usinagem de aços duros, aços inoxidáveis e, sobretudo, superligas de níquel (MACHADO, 2015).

2.3.3 Desgaste de ferramentas de corte

Estudos, como o realizado por Evangelista (2018), exploram o desgaste da ferramenta como uma variável-chave que influencia as respostas do processo. Alterações nas variáveis, como o desgaste da ferramenta de corte, têm impactos significativos nos resultados principais do processo de usinagem. Um exemplo disso é a utilização de ferramentas de corte com ângulo de saída positivo é uma estratégia que reduz a pressão sobre a ferramenta, minimizando o contato entre a ferramenta e o cavaco (SOUSA, 2020). O desgaste mais comum é o desgaste de flanco, decorrente da usinagem que permite o desgaste frontal. Isso resulta na deterioração da superfície da peça e alterações na aresta de corte, frequentemente associadas ao aumento da velocidade de corte (V_c), conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Degaste de flanco.



Fonte: Sandvik (2024).

O desgaste de flanco é o tipo mais comum de desgaste e ocorre nas superfícies de folga da ferramenta. Geralmente é causado pela abrasão resultante da interação entre os materiais da peça e os componentes duros da ferramenta de corte. Esse tipo de desgaste é acelerado pelo aumento na velocidade de corte (V_c) e leva à perda do material cortante da ferramenta,

sinalizando o fim de sua vida útil. Além desse tipo de desgaste tem-se outros como o desgaste de cratera, que geralmente surge na superfície de saída da ferramenta, na zona onde o cavaco desliza ao longo do corte. Aparece devido à combinação de mecanismos de desgaste, incluindo difusão ou abrasão. Não é tão comum em certos processos de usinagem, especialmente quando se utilizam ferramentas de metal duro com revestimento, ferramentas cerâmicas ou quando o material é frágil (GAMA, 2014). Outro tipo de desgaste que pode ocorrer é o desgaste de entalhe, originado por danos excessivos na face e no flanco da ferramenta, especificamente na linha de profundidade de corte. Esse desgaste é gerado pela adesão de material e deformação na superfície, sendo mais comum na usinagem de aços inoxidáveis (BORGES, 2020). A Figura 17 a seguir ilustra esses tipos de desgaste, facilitando a visualização dos danos mencionados.

Figura 17 – Tipo de desgaste: (a) Desgaste de cratera; (b) Desgaste de entalhe.



Fonte: Adaptado Sandvik (2024).

As ocorrências durante o processo de corte de uma ferramenta de usinagem, de acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013), englobam diversas avarias. A perda contínua de partículas durante a ação do corte caracteriza os desgastes, sendo as avarias classificadas da seguinte forma:

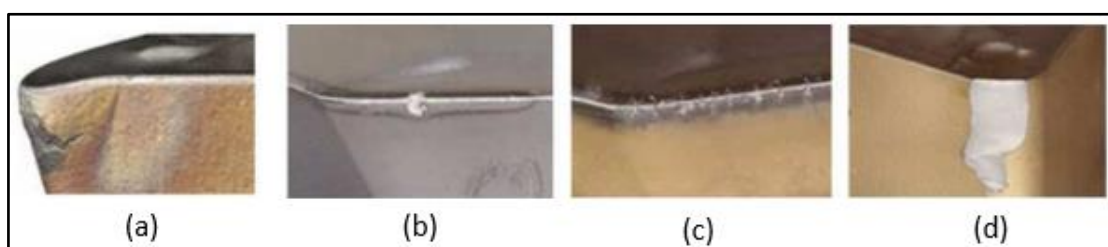
Trincas: Que são avarias provocadas por variações de temperatura ou grandes esforços mecânicos. Podem originar-se termicamente em situações de variação de temperatura, resultando em trincas perpendiculares à aresta de corte. Também podem ter origem mecânica, apresentando trincas paralelas à aresta de corte (RODRIGUES, 2023). Verificar figura 18, para visualização do conceito.

Lascamento: Esse tipo de avaria é caracterizado pela remoção de partículas maiores da superfície da ferramenta. Geralmente ocorre em ferramentas compostas por materiais frágeis ou em arestas de corte pouco reforçadas (RODRIGUES, 2023). Verificar figura 18, para visualização do conceito.

Deformação plástica: A deformação plástica resulta em deformações na aresta de corte da ferramenta, provenientes de altas pressões e temperaturas na superfície de corte. Essa avaria prejudica a formação do cavaco e impacta o controle dimensional da peça usinada (RODRIGUES, 2023). Verificar figura 18, para visualização do conceito.

Quebra: O tipo de avaria conhecido como quebra ocorre quando há um desgaste mais acentuado na ferramenta, podendo levar à sua ruptura. Geralmente, esse evento é observado em ferramentas mais duras, sujeitas a cargas excessivas durante a usinagem, especialmente em cortes interrompidos ou paradas bruscas no processo (RODRIGUES, 2023). A Figura 18 a seguir ilustra os conceitos, mostrando visualmente as condições que podem levar aos desgastes apresentados da ferramenta.

Figura 18 – Tipos de avarias: (a) Deformação plástica; (b) Lascamento; (c) Trinca; (d) Quebra.



Fonte: Adaptado Sandvik (2023).

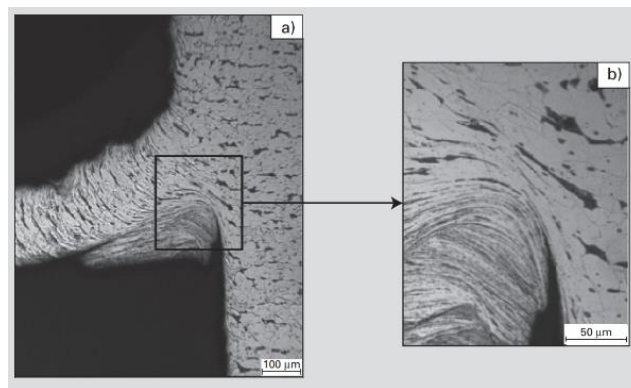
2.3.4 Aresta postiça de corte (APC)

Além das avarias, durante a usinagem em velocidades de corte intermediárias, pode-se observar um fenômeno conhecido como aresta postiça de Corte (APC) na interface entre a ferramenta e o cavaco. Há evidências indicando que a APC mantém uma continuidade com o material da peça e do próprio cavaco, ao invés de se apresentar como um corpo separado de material encruado sobre o qual o cavaco se desloca. A Figura 19 exibe imagens de uma APC registrada durante testes com o dispositivo de parada rápida no processo de torneamento do aço ABNT 12L14 de fácil corte.

Na interface, a primeira camada do material da peça estabelece ligações atômicas com a ferramenta, resultando no endurecimento a frio desse material. Esse fenômeno eleva o limite de escoamento da camada, tornando a tensão de cisalhamento insuficiente para romper essas ligações. As deformações continuam nas camadas adjacentes superiores, mais distantes da interface, até que também estejam suficientemente encruadas. Esse processo se repete,

formando uma sequência de camadas que compõem a APC. No entanto, o tamanho da APC não pode aumentar indefinidamente. Quando atinge um valor em que a tensão de cisalhamento é capaz de alterar a zona primária de cisalhamento (que até então ocorria acima da APC), partes da estrutura da APC são cisalhadas e arrastadas entre a superfície da peça e a superfície de folga da ferramenta. Esse processo de ruptura e arrastamento também pode ocorrer entre a superfície inferior do cavaco e a superfície de saída da ferramenta.

Figura 19 – (a) Aresta postiça de Corte; (b) Detalhe ampliado do topo da APC.



Fonte: Machado (2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do projeto de pesquisa ocorreu no Laboratório de Estudo da Usinagem, situado na Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá da UNESP. Onde se utilizou um centro de torneamento CNC Romi modelo GL 240M (conforme Figura 20), para o qual foi implementado um sistema de aquisição de dados.

Figura 20 - Centro de Torneamento CNC Romi modelo GL 240M.



Fonte: Autor

3.1 CORPO DE PROVA

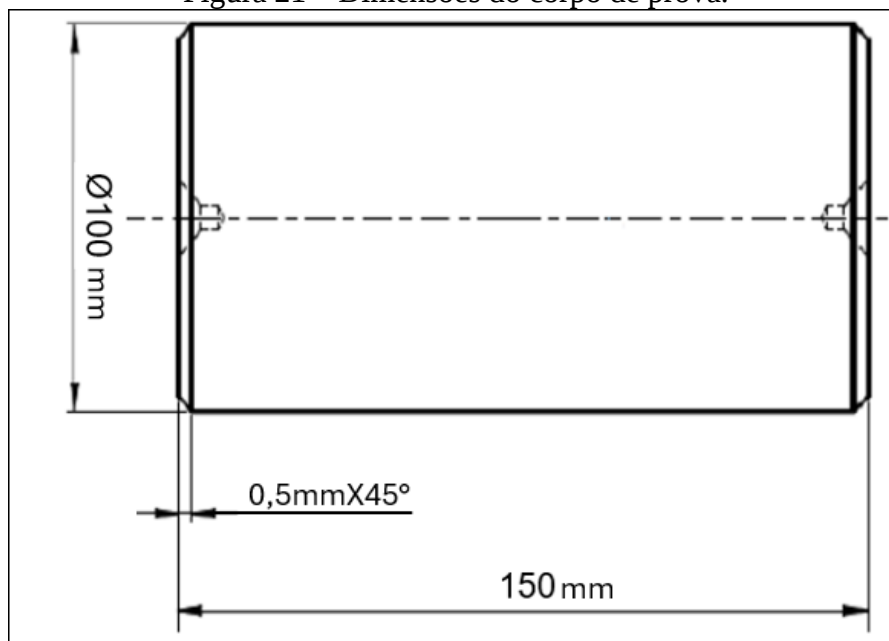
Neste estudo, utilizou-se uma barra cilíndrica feita de aço ABNT 52100 como corpo de prova, fornecida pela GGD Metals. A peça foi submetida a tratamento de têmpera e revenimento, o qual foi realizado pelo Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), resultando em uma dureza final de 66 HRC. Além disso, as dimensões do corpo de prova eram $\varnothing 100$ mm x 150 mm de comprimento, conforme figura 21.

3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA A COLETA DOS DADOS

Para a coleta em tempo real dos sinais de potência de corte, emissão acústica e vibração, implementou-se um sistema composto por um módulo de canais da marca *National Instruments* modelo BNC-2120. Esse módulo está conectado a uma placa de aquisição de dados também da mesma marca, a qual está integrada a um computador. A captação dos dados recebidos pela placa de aquisição de dados foi realizada por meio de um programa supervisorio desenvolvido no software LABVIEW da *National Instruments*. Esse programa permite receber e analisar os

dados em tempo real, além de gravá-los para posterior tratamento dos resultados.

Figura 21 – Dimensões do corpo de prova.



Fonte: Autor

Para registrar a potência consumida pelo motor do centro de usinagem, foram empregados sensores de corrente LEM, modelo AT 100 B10, como evidenciado na Figura 22. O sinal proveniente do sensor, que representa a potência, foi capturado por uma placa de aquisição de dados e registrado ao longo da realização dos ensaios.

Figura 22 – Sensor utilizado para registro da potência.



Fonte: Autor

Já para a captação da emissão acústica foi realizada por meio de um módulo específico composto por um sensor piezoelétrico (Figura 23) de emissão acústica, associado a um

amplificador de sinal com saída retificada em RMS (*Root Mean Square*), da marca *Physical Acoustics Corporation*, com o sensor sendo do modelo R15A e o amplificador de sinal do modelo 1272-1000. E para os dados relativos à vibração foram obtidos utilizando um sensor da marca *Vibro Control*, modelo TV-100. Ambos os sensores foram posicionados junto ao porta-ferramenta.

Figura 23 – Sensor piezelétrico, marca Vibro Control, modelo TV100.



Fonte: Autor

Tratando das medições das rugosidades R_a , R_t e R_z foram realizadas nas peças após cada ensaio, utilizando o rugosímetro portátil MAHR modelo *MarSurf M300 + RD18*, com um cut-off de 0,8 e um comprimento de amostragem de 4 mm. A Figura 24 exibe uma imagem do aparelho empregado para a medição da rugosidade.

Figura 24 – Rugosímetro utilizado no estudo



Fonte: Autor

3.3 ENSAIO DE USINAGEM

Com o intuito de avaliar a usinabilidade do aço ABNT 52100 endurecido no processo de torneamento e verificar a eficácia da ferramenta cerâmica experimental, foi analisado o comportamento das variáveis de saída do processo, como rugosidade, desgaste, avarias, potência de usinagem, vibração, emissão acústica, tipo e formas de cavaco.

Ao adotar um arranjo fatorial completo, decidimos empregar duas velocidades de corte (V_c) de 150 e 200 m/min, utilizando uma profundidade de usinagem (a_p) fixa de 0,2 mm e três tipos de avanço (f) de 0,15 mm/rev, 0,20 mm/rev e 0,25 mm/rev. Nesse contexto, a profundidade de usinagem é considerada uma variável fixa para este experimento, enquanto as velocidades de corte e os avanços são os fatores que variam.

O número total de combinações é calculado pela multiplicação dos níveis dos fatores relevantes, resultando na equação 9.

$$(\text{Níveis de } V_c) \times (\text{Níveis de } f) = 2 \times 3 = 6 \text{ Combinações} \quad (9)$$

Como realizaremos três repetições para cada uma dessas condições, o total de ensaios realizados foi conforme a Equação 10. Para uma melhor visualização dos resultados, segue a Tabela 3, que apresenta os dados dos ensaios realizados.

$$\text{Total de ensaios} = \text{Total de combinações} \times \text{Repetições} = 6 \times 3 = 18 \text{ ensaios} \quad (10)$$

Tabela 3 – Combinação experimental para os ensaios com a ferramenta cerâmica.

Ensaio	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Profundidade de Usinagem (mm)
1 a 3	150	0,15	0,2
4 a 6	150	0,2	0,2
7 a 9	150	0,25	0,2
10 a 12	200	0,15	0,2
13 a 15	200	0,2	0,2
16 a 18	200	0,25	0,2

Fonte: Autor

Esse arranjo permite uma análise abrangente da influência das variáveis selecionadas sobre os resultados, possibilitando observar não apenas os efeitos individuais de cada fator, mas também as interações entre eles. Essa abordagem é fundamental para entender a usinabilidade

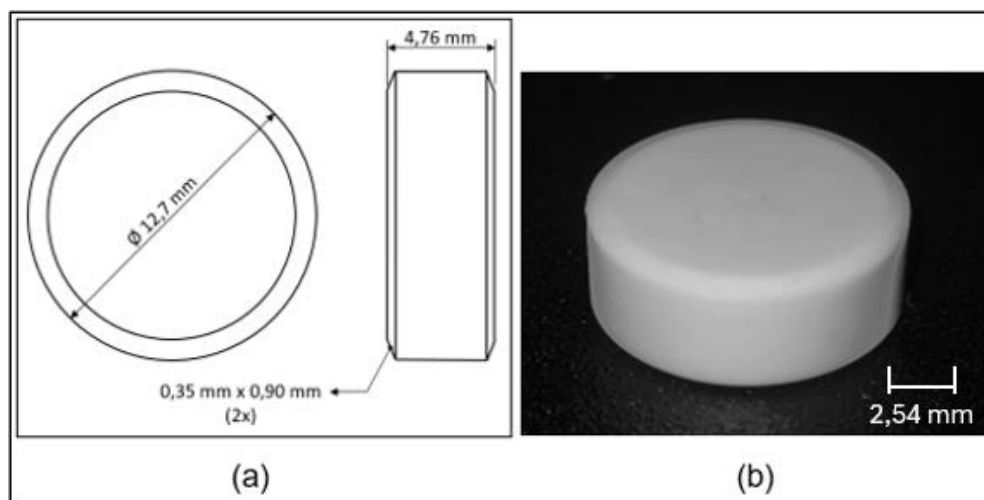
do material em questão e para avaliar o desempenho das condições de usinagem adotadas.

Para cada repetição e para cada velocidade de corte, a usinagem foi realizada com a mesma aresta de corte, totalizando 6 arestas de cortes utilizadas no ensaio. Além disso, o percurso de avanço, para cada combinação de avanço e velocidade de corte era de $L_f = 10$ mm. Além das variáveis de saída coletadas pelos instrumentos, foram realizadas duas medições de rugosidade para R_a , R_t e R_z em diferentes posições do corpo de prova, vale ressaltar que todo o procedimento de medição da rugosidade foi realizado a partir das diretrizes da norma ABNT NBR ISO 4288:2008.

Já a pastilha empregada foi uma cerâmica experimental desenvolvidas na UNESP em escala laboratorial no Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia e Ciências, no campus de Guaratinguetá, cuja sua composição se dá com 97,5% de Al_2O_3 , 2% de TZP (*Tetragonal Zirconia Polycrystals*) e 0,5% de MgO. A alumina pura é frágil em algumas condições de usinagem, mas a adição de óxido de magnésio (MgO) melhora sua tenacidade (Duarte, 2022) ao atuar na sinterização, o que resulta em uma estrutura mais uniforme e densa, aumentando sua resistência mecânica. Isso torna a alumina mais adequada para usinagem (Barsoum, 2003; Alves, 2018), permitindo sua aplicação em processos sem a necessidade de fluidos de corte, o que reduz a poluição, aumenta a segurança e diminui os custos operacionais (Callisaya, 2021). Assim, a dopagem controlada com MgO torna a alumina um material mais eficiente e resistente para essas operações. Além disso, a adição de zircônia à alumina no processo de sinterização, prática já consolidada para melhorar a densificação das cerâmicas à base de alumina, só teve seus mecanismos de aumento da tenacidade à fratura compreendidos nas últimas duas décadas. A zircônia dispersa na matriz da alumina contribui para resistir à propagação de trincas, e sua introdução em pequenas quantidades durante a sinterização forma uma solução sólida, que introduz defeitos na estrutura cristalina, facilitando a densificação e melhorando as propriedades mecânicas da cerâmica, como a resistência e tenacidade. (WANG, 1989; MORRELL, 2000). Em resumo, a adição de MgO melhora a tenacidade da alumina ao atuar na sinterização, resultando em uma estrutura mais densa e resistente, e a zircônia (TZP) dispersa na matriz de alumina contribui para resistir à propagação de trincas, aumentando a resistência e a tenacidade da cerâmica, tornando-a mais adequada para processos de usinagem sem a necessidade de fluidos de corte.

Sabendo disso, disso, seguiu-se a norma ISO1832 para geração da geometria da ferramenta, a qual entra na categoria RNGN 120400-T0,20-20 onde possui 12,7 mm de diâmetro e 4,76 mm de espessura, conforme mostra a figura 25.

Figura 25 – (a) Dimensões da ferramenta de cerâmica desenvolvida; (b) Ferramenta cerâmica desenvolvida.



Fonte: Autor

3.4 TRATAMENTO DO DADOS OBTIDOS

Os dados adquiridos de potência de corte, emissão acústica e vibração passarão por tratamento no software MatLab, resultando nos valores médios a cada segundo de usinagem. Posteriormente, esses dados, juntamente com as informações de rugosidade e desgaste, serão submetidos a análises estatísticas utilizando o software *Minitab*. O tratamento estatístico abrangerá análises de variância (ANOVA) com 95% de confiança, conforme o planejamento experimental adotado, que segue um modelo de fatorial completo.

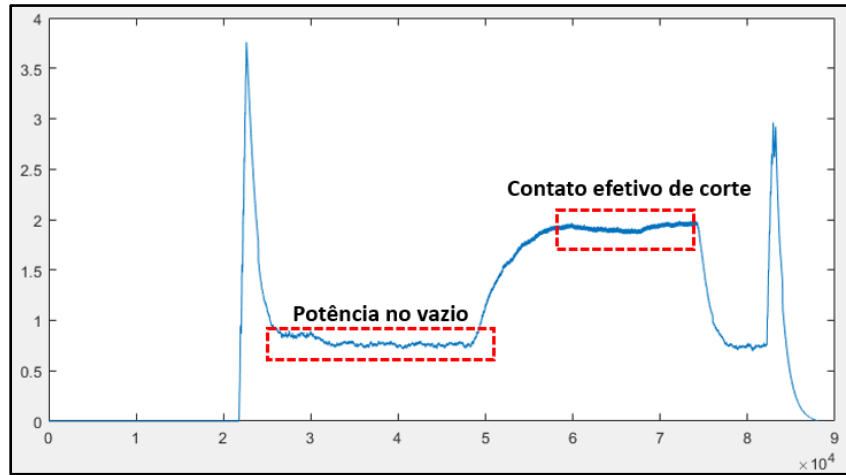
Nesse tipo de planejamento, todos os níveis de cada fator são combinados com todos os níveis dos outros fatores, permitindo uma análise abrangente das interações entre eles. Essa abordagem permite avaliar não apenas os efeitos individuais dos fatores, mas também como eles interagem, influenciando as variáveis de saída. Na avaliação estatística, foi investigada a influência dos parâmetros nas variáveis de saída, bem como o desempenho da ferramenta, visando verificar a usinabilidade do material e a aplicabilidade da ferramenta.

A segregação dos dados foi realizada através da identificação no gráfico gerado pelo software *Labview* do primeiro contato da ferramenta com a peça, excluindo assim a potência em vazio. Essa última representa o consumo de potência relacionado ao deslocamento dos mecanismos do CNC, atritos e outras perdas, permitindo a distinção e separação dos dados de potência, vibração e emissão acústica nos momentos em que a ferramenta efetivamente interage com a peça. A figura 26 abaixo exibe os pontos utilizados nesse processo.

Após a conclusão da separação, o software gerou gráficos representativos da potência,

vibração e emissão acústica durante o corte real da ferramenta. Na Figura 26, pode-se observar a potência em vazio e o efetivo contato da ferramenta com a peça.

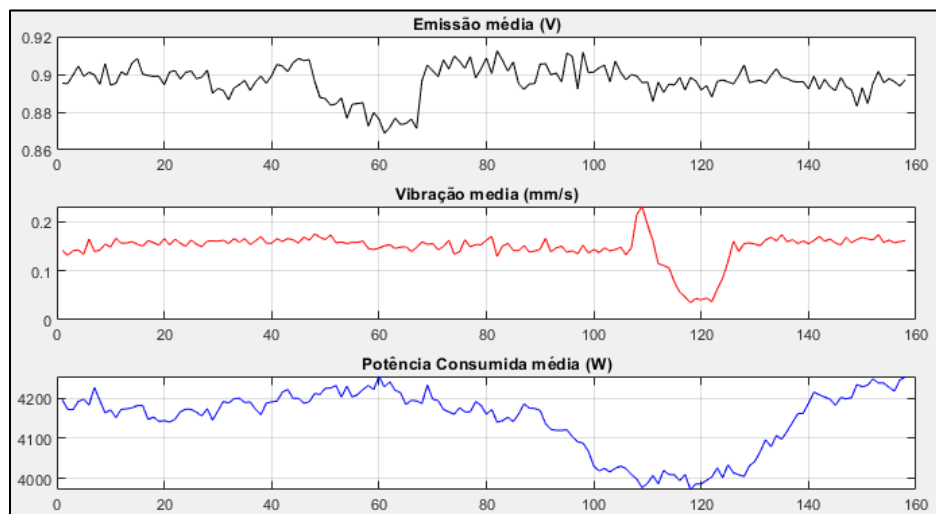
Figura 26 – Região identificada no gráfico com a potência no vazio e o contato efetivo de corte.



Fonte: Autor.

Os valores máximos de emissão acústica, potência e vibração, gerados pelo software, foram submetidos a análises estatísticas de variância no software Minitab 19. Os gráficos resultantes das análises de emissão acústica, potência e vibração, produzidos pelo software *Matlab- RB2023b*, são apresentados na Figura 27.

Figura 27 – Exemplo dos gráficos de emissão acústica, vibração e potência

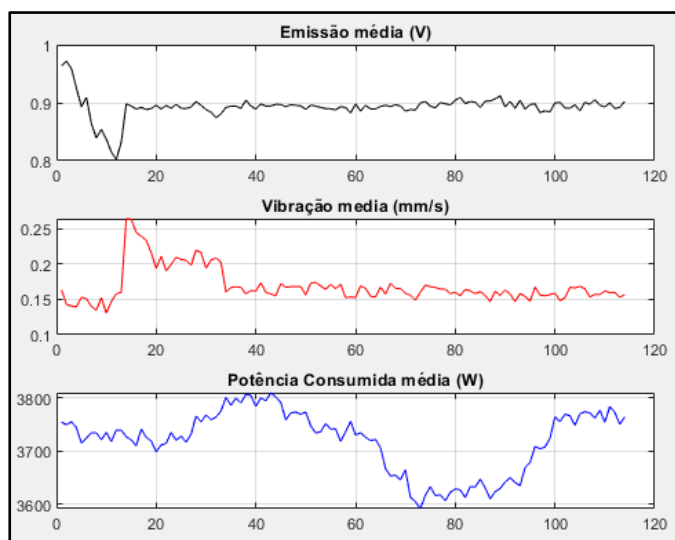


Fonte: Autor.

Observa-se, conforme o Anexo A, que a potência consumida média manteve praticamente

o perfil em todos os 18 ensaios realizados, como ilustrado na Figura 27. Além disso, destaca-se o Ensaio 11 por apresentar uma certa constância nos valores de emissão acústica e vibração, conforme evidenciado na Figura 28, parâmetros utilizados estão destacados no Anexo A.

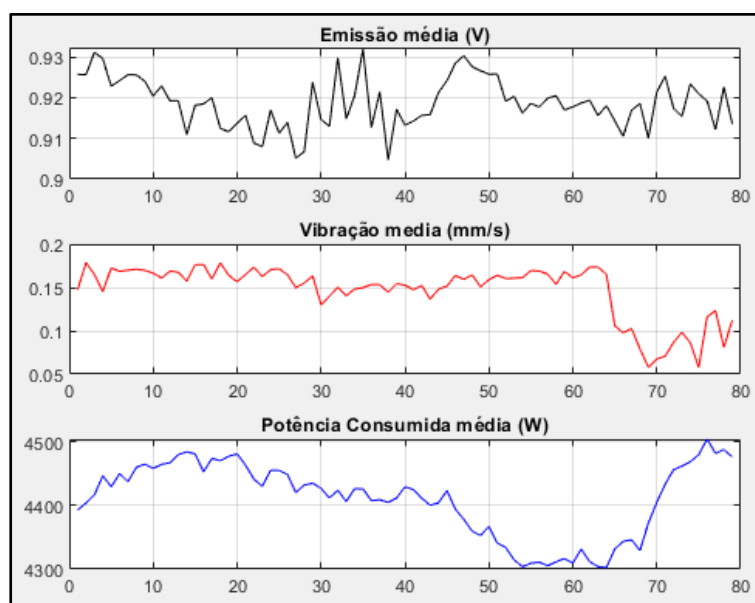
Figura 28 - Gráficos pelo tempo do ensaio 11



Fonte: Autor.

Outro destaque é o Ensaio 15, que apresentou uma certa constância nos valores de vibração ao longo do teste. No entanto, para a emissão acústica, esse comportamento não foi observado, conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 - Gráficos pelo tempo do ensaio 15.



Fonte: Autor.

Vale ressaltar que todos os gráficos apresentaram valores de vibração muito baixos, chegando no máximo a 0,25 mm/s, o que, em termos dessa grandeza física, é um valor bastante reduzido.

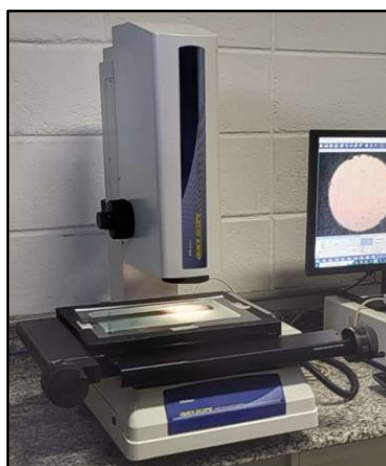
3.5 ANÁLISE MICROSCÓPICA DA FERRAMENTA

Os desgastes das arestas de corte resultantes dos ensaios foram avaliados utilizando um microscópio modelo QS-LBZ - *Visual Quick Scope* série 359, da marca Mitutoyo, como apresentado na Figura 30. Esse microscópio possui um sistema de captura de imagens por meio de um software dedicado, permitindo a captura de imagens para registrar o aspecto do desgaste e das avarias. Além disso, foram coletadas imagens dos cavacos no mesmo equipamento para a identificação das formas dos cavacos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentam as análises conclusivas de emissão acústica, vibração, potência e rugosidade, bem como as interações entre as variáveis de entrada, como velocidade de corte (V_c), profundidade de usinagem (a_p).

Figura 30 - Microscópio marca Mitutoyo modelo QS-LBZ -Visual Quick Scope série 359.



Fonte: Autor.

4.1 EMISSÃO ACÚSTICA

A relevância dos fatores controlados velocidade de corte e avanço, bem como a interação entre eles, em relação à resposta de emissão acústica média, é detalhada na Tabela 4. Fatores ou interações que apresentaram valores de P inferiores a 0,05, conforme calculados pelo Minitab, indicaram uma influência significativa nos resultados. O valor de p representa o resultado de um teste de hipótese, onde se estabelece uma hipótese nula (H_0) e uma hipótese alternativa (H_1). A hipótese nula é rejeitada quando o valor de p é inferior a 0,05, indicando que não há diferença significativa entre as médias dos grupos comparados. Por outro lado, um valor de P superior a 0,05 sugere a aceitação da hipótese alternativa, o que implica que pelo menos uma das médias é significativamente diferente das demais.

Pode-se perceber que os parâmetros analisados e a interação entre eles possuem relevância estatística, pois, no caso do valor P, todos foram menores que 0,05. Dessa forma, a análise estatística realizada indica que a velocidade de corte e o avanço contribuem, de forma significativa, para o aumento da emissão acústica. A Figura 31 oferece uma visualização desse resultado, evidenciando a influência desses parâmetros na emissão acústica.

Nos pontos que apresentaram menor valor de emissão acústica, observou-se uma combinação de alta velocidade de corte (200 m/min) e baixo avanço (0,15 mm/rev). Nota-se que o avanço tem maior relevância no valor da emissão acústica do que a velocidade de corte, pois a diferença de um ponto para outro é mais significativa no caso do avanço. Para verificar com mais detalhes a interação entre esses dois parâmetros, a Figura 32 destaca essa relação.

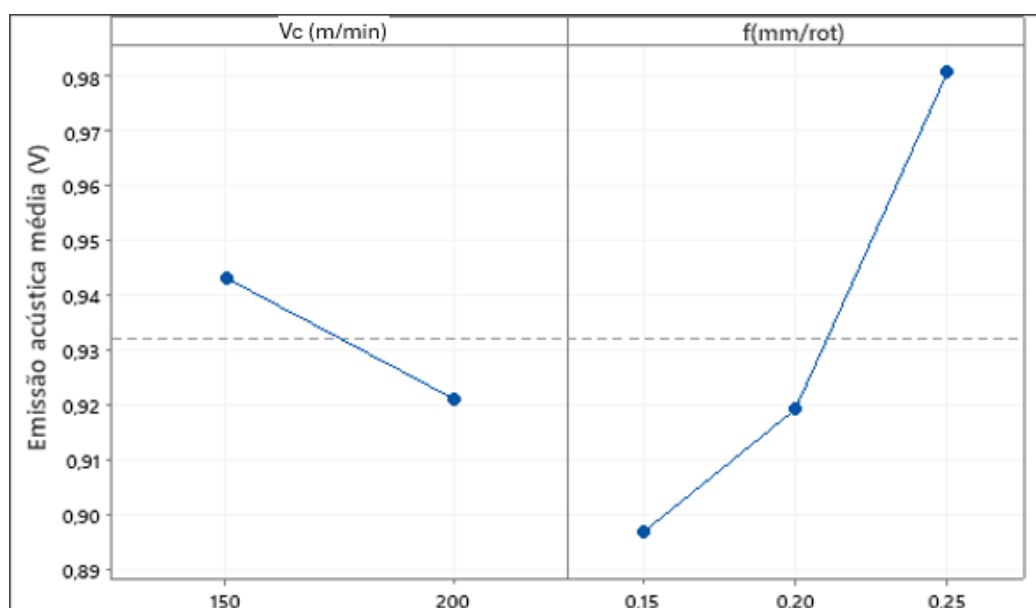
Tabela 4 – Análise de variância para os valores de emissão acústica média.

Fonte	GL	SQA	MQA	Valor F	Valor P
Modelo	5	0,027886	0,005577	41,47	0,000
Linear	3	0,024940	0,008313	61,81	0,000
Vc (m/min)	1	0,002196	0,002196	16,32	0,002
f(mm/rot)	2	0,022745	0,011372	84,55	0,000
Interações bidirecionais	2	0,002946	0,001473	10,95	0,002
Vc (m/min)*f(mm/rot)	2	0,002946	0,001473	10,95	0,002
Erro	12	0,001614	0,000134		
Total	17	0,029500			

GL=Graus de Liberdade / SQA=Soma dos Quadrados Ajustada /
MQA=Média dos Quadrados Ajustada

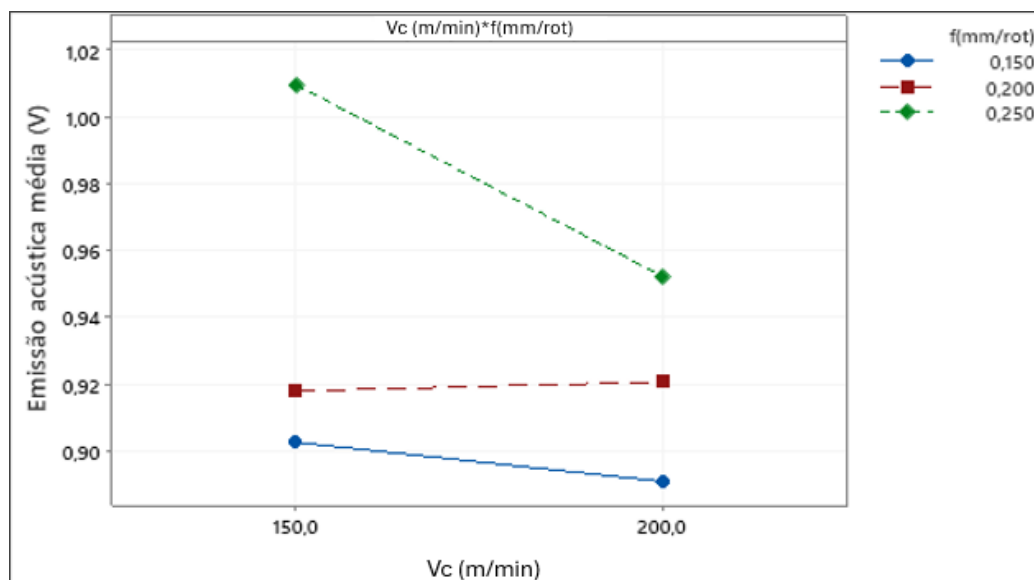
Fonte: Autor.

Figura 31 - Gráfico dos efeitos principais para emissão acústica média



Fonte: Autor.

Figura 32 - Gráfico das interações para emissão acústica média



Fonte: Autor.

Pode-se notar que para valores medianos de avanço, independentemente da velocidade corte, a emissão acústica se mantém quase que inalterada, porém já para os valores extremos, os valores do avanço influenciam no resultado da emissão acústica, que no caso em questão, os valores mais altos têm mais relevância do que valores mais baixos, relacionando claro com os valores de velocidade de corte altos, uma vez sabendo que para valores baixos de velocidade corte, os valores de avanço aumentam a emissão acústica.

4.2 VIBRAÇÃO

A relevância dos fatores controlados velocidade de corte e avanço, bem como a interação entre eles, em relação à resposta de vibração, é detalhada na Tabela 5. Fatores ou interações que apresentaram valores de P inferiores a 0,05, conforme calculados pelo Minitab, indicaram uma influência significativa nos resultados.

Pode-se perceber que os parâmetros analisados e a interação entre eles não possuem relevância estatística, pois, no caso do valor P, todos foram maiores que 0,05. Dessa forma, a análise estatística realizada indica que a velocidade de corte e o avanço até contribuem para o aumento da vibração, mas a distância entre os valores é muito pequena, quando se olha para a escala do gráfico. A Figura 33 proporciona uma visualização do que foi exposto, evidenciando a correlação quase que insignificante entre os parâmetros e a vibração.

Pode-se perceber que, para os valores de velocidade de corte, esses interferem de forma

ínfima na vibração média. Já os valores de avanço têm uma relevância maior, pois a distância vertical de um ponto a outro é maior, porém, estatisticamente, não é relevante, estando praticamente no mesmo ponto. Em uma segunda análise, a Figura 34 ilustra a interação entre os parâmetros utilizados, proporcionando uma visualização clara dessa relação.

Tabela 5 – Análise de variância para os valores de vibração média.

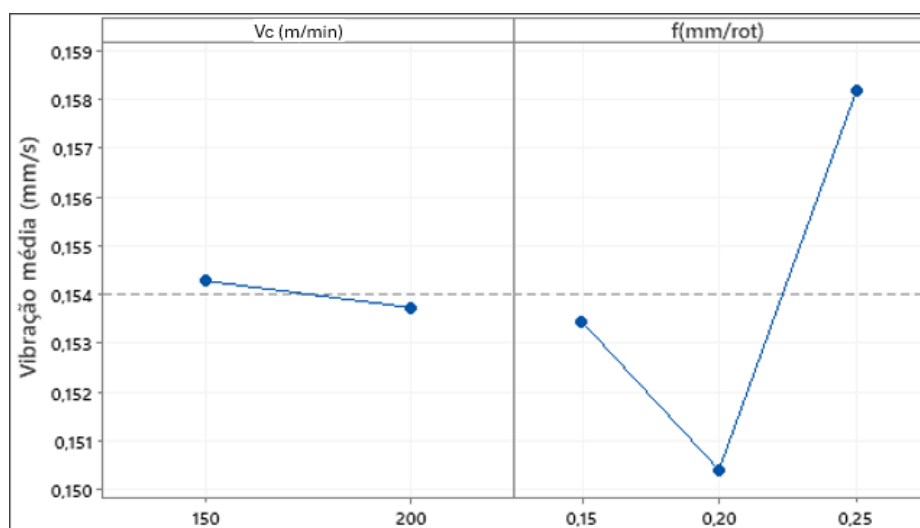
Fonte	GL	SQA	MQA	Valor F	Valor P
Modelo	5	0,000291	0,000058	0,28	0,918
Linear	3	0,000184	0,000061	0,29	0,832
Vc (m/min)	1	0,000001	0,000001	0,01	0,938
f(mm/rot)	2	0,000183	0,000092	0,43	0,659
Interações bidirecionais	2	0,000107	0,000054	0,25	0,781
Vc (m/min)*f(mm/rot)	2	0,000107	0,000054	0,25	0,781
Erro	12	0,002541	0,000212		
Total	17	0,002833			

GL=Graus de Liberdade / SQA=Soma dos Quadrados Ajustada /
MQA=Média dos Quadrados Ajustada

Fonte: Autor.

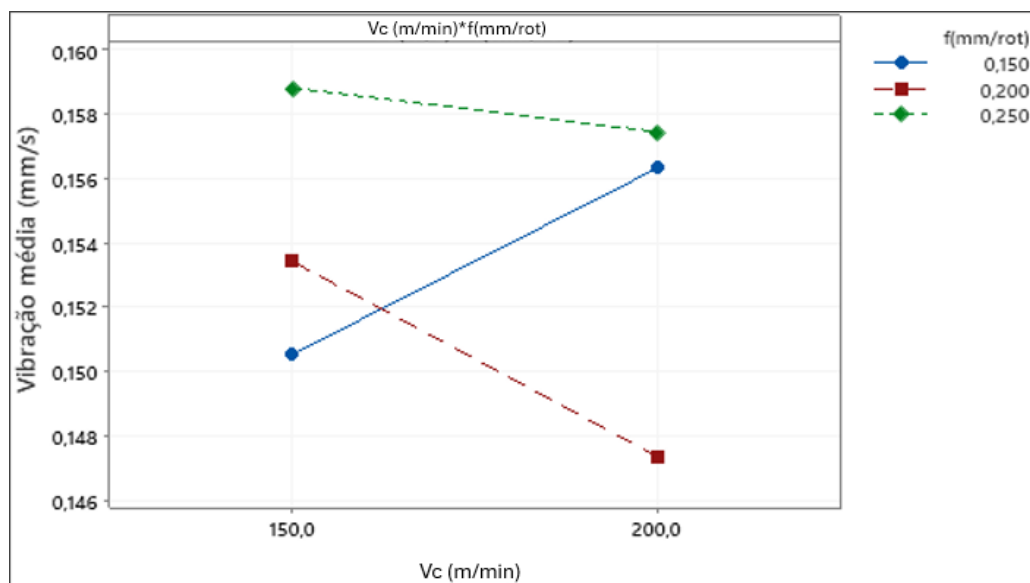
Pode -se notar, que para o caso da vibração média, avanços altos, independentemente da velocidade de corte, tem muita relevância para valores altos de vibração. Já para valores medianos e baixos, a velocidade interfere bastante, pode-se perceber que para valores medianos de avanço, a velocidade de corte contribui bastante para diminuição da vibração, já para valores baixos de avanço, tende a aumentar. Porém, se forem comparados os valores, esses tornam-se irrelevantes, estatisticamente falando.

Figura 33 - Gráfico dos efeitos principais para vibração média.



Fonte: Autor.

Figura 34 - Gráfico das interações para vibração média.



Fonte: Autor.

4.3 POTÊNCIA MÉDIA

A relevância dos fatores controlados velocidade de corte e avanço, bem como a interação entre eles, em relação à resposta de potência média, é detalhada na Tabela 6. Fatores ou interações que apresentaram valores de P inferiores a 0,05, conforme calculados pelo MINITAB, indicaram uma influência significativa nos resultados.

Tabela 6 - Análise de variância para os valores de potência média.

Fonte	GL	SQA	MQA	Valor F	Valor P
Modelo	5	4609214	921843	25,15	0,000
Linear	3	4595234	1531745	41,78	0,000
Vc (m/min)	1	518943	518943	14,16	0,003
f(mm/rot)	2	4076291	2038146	55,60	0,000
Interações bidirecionais	2	13980	6990	0,19	0,829
Vc (m/min)*f(mm/rot)	2	13980	6990	0,19	0,829
Erro	12	439904	36659		
Total	17	5049118			

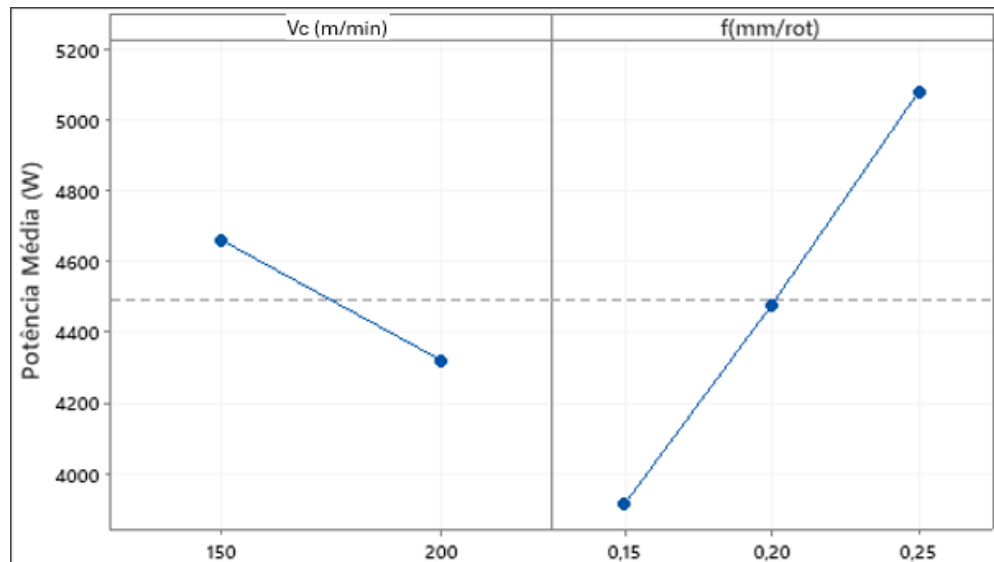
GL=Graus de Liberdade / SQA=Soma dos Quadrados Ajustada /
MQA=Média dos Quadrados Ajustada

Fonte: Autor.

Pode-se perceber que os parâmetros independentes têm um certo impacto no aumento da potência média, pois o valor P está menor do que 5%. Com isso, o avanço e a velocidade de corte, isoladamente, têm um impacto significativo na potência. No entanto, a interação entre

esses parâmetros não apresenta valores de relevância estatística. As Figuras 35 e 36 oferecem uma melhor visualização desse cenário, ilustrando as relações entre os parâmetros e a potência média.

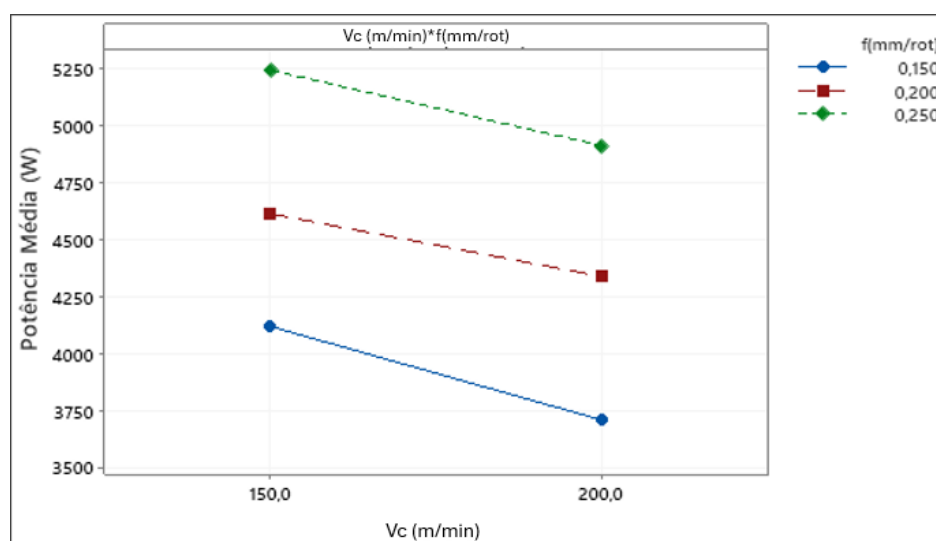
Figura 35 - Gráfico dos efeitos principais para potência média.



Fonte: Autor.

Pode-se notar, através dos gráficos, que o que foi dito se comprova, uma vez que, na figura 35 a diferença de valores de potência é bem distante, se comparado na mesma variável, sendo mais acentuados no caso do avanço do que na velocidade de corte.

Figura 36 - Gráfico das interações para potência média.



Fonte: Autor.

Já para a figura 36, percebe-se uma certa, continuidade no comportamento nas três

interações, ou seja, nos três casos abordados a potência média acaba diminuindo, para qualquer uma das configurações, claramente possuem valores de potência bem diferentes, porém o comportamento é o mesmo.

4.4 RUGOSIDADE

Nesta seção, foi realizado uma análise sobre os fatores controlados como velocidade de corte e avanço, e de suas interações nas rugosidades R_a , R_t e R_z (μm). Os gráficos e escalas foram calculados pelo Software MINITAB para ilustrar o impacto dos fatores individuais e de suas interações nos resultados. Importante notar que fatores ou interações com valores de P inferiores a 0,05, calculados pelo MINITAB, exerceram uma influência estatisticamente significativa nos resultados obtidos.

4.4.1 Desvio aritmético médio do perfil em avaliação R_a

Mediante a análise dos resultados constantes na Tabela 7, associada à análise de variância, observou-se uma influência significativa da velocidade de corte (V_c) e do avanço (f) no desvio aritmético médio do perfil em avaliação.

Pode-se perceber que os parâmetros analisados influenciaram significativamente o desvio aritmético médio do perfil em avaliação, uma vez que o P-Value está em zero tanto para as variáveis isoladas quanto para suas interações.

Tabela 7 - Análise de variância para os valores do desvio aritmético médio do perfil em avaliação.

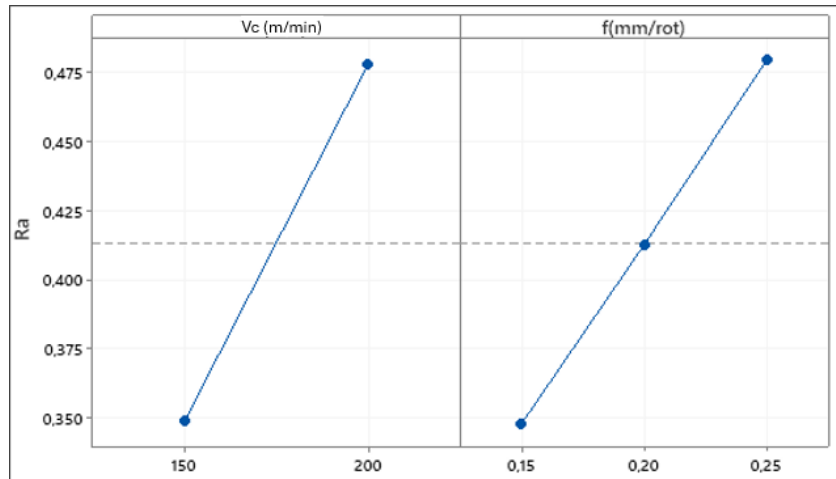
Fonte	GL	SQA	MQA	Valor F	Valor P
Modelo	5	0,177915	0,035583	53,43	0,000
Linear	3	0,126704	0,042235	63,42	0,000
V_c (m/min)	1	0,074691	0,074691	112,16	0,000
f (mm/rot)	2	0,052013	0,026007	39,05	0,000
Interações bidirecionais	2	0,051211	0,025605	38,45	0,000
V_c (m/min)* f (mm/rot)	2	0,051211	0,025605	38,45	0,000
Erro	12	0,007991	0,000666		
Total	17	0,185906			

GL=Graus de Liberdade / SQA=Soma dos Quadrados Ajustada /
MQA=Média dos Quadrados Ajustada

Fonte: Autor.

As Figuras 37 e 38 proporcionam uma melhor visualização desse impacto, ilustrando como os diferentes parâmetros afetam o desvio aritmético médio do perfil em avaliação

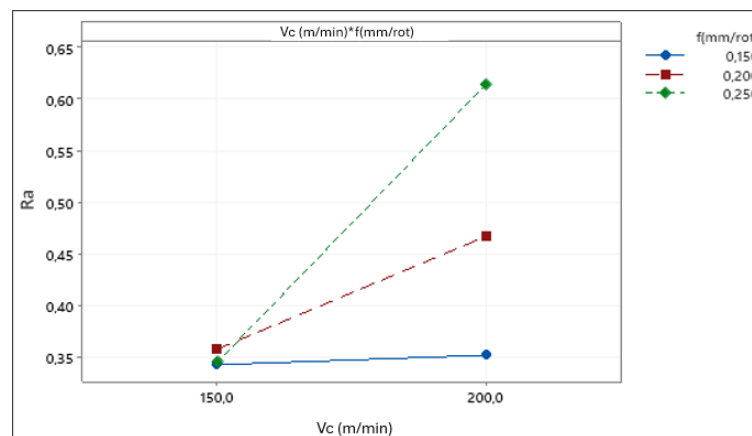
Figura 37 - Gráfico dos efeitos principais para o desvio aritmético médio do perfil.



Fonte: Autor.

A Figura 37 mostra que, com o aumento dos valores dos parâmetros de usinagem, a rugosidade superficial aumenta significativamente. Já na Figura 38, observa-se que a velocidade de corte exerce grande influência na qualidade do acabamento. Em baixas velocidades, os valores do desvio aritmético médio do perfil em avaliação permanecem próximos, reforçando que a velocidade de corte é um fator fundamental na determinação do desvio aritmético médio do perfil em avaliação. Nesse caso específico, a rugosidade atinge aproximadamente 0,35.

Figura 38 - Gráfico das interações para o desvio aritmético médio do perfil em avaliação



Fonte: Autor.

É importante destacar que, em muitos processos de usinagem, o aumento da velocidade de corte geralmente tende a reduzir a rugosidade superficial. No entanto, nesta condição específica, com o uso desta ferramenta de corte, observou-se o comportamento oposto, em que a rugosidade aumentou à medida que a velocidade de corte foi elevada. Isso evidencia uma divergência importante em relação aos processos convencionais de usinagem, destacando a necessidade de considerar as particularidades dessa ferramenta, como por exemplo o tamanho do chanfro realizado, pode ter contribuído para esse efeito aparecer.

4.4.2 Rugosidade R_t

Mediante a análise dos resultados constantes na Tabela 8, associada à análise de variância, observou-se uma influência significativa da velocidade de corte (V_c) e do avanço (f) na rugosidade R_t .

Pode-se notar que os parâmetros analisados não apresentaram relevância estatística, uma vez que o P-Value está acima de 5%. Apesar disso, com base nos valores da Tabela 8, entre a velocidade de corte e o avanço, o segundo tem mais chance de interferir na rugosidade R_t , devido aos seus valores próximos da relevância estatística. As Figuras 39 e 40 oferecem uma análise mais detalhada, permitindo uma melhor compreensão das relações entre os parâmetros e a rugosidade R_t .

Tabela 8 - Análise de variância para os valores de rugosidade R_t

Fonte	GL	SQA	MQA	Valor F	Valor P
Modelo	5	5,3028	1,0606	1,31	0,325
Linear	3	4,2955	1,4318	1,76	0,208
V_c (m/min)	1	0,5170	0,5170	0,64	0,441
f (mm/rot)	2	3,7785	1,8893	2,33	0,140
Interações bidirecionais	2	1,0073	0,5036	0,62	0,554
V_c (m/min)* f (mm/rot)	2	1,0073	0,5036	0,62	0,554
Erro	12	9,7485	0,8124		
Total	17	15,0512			

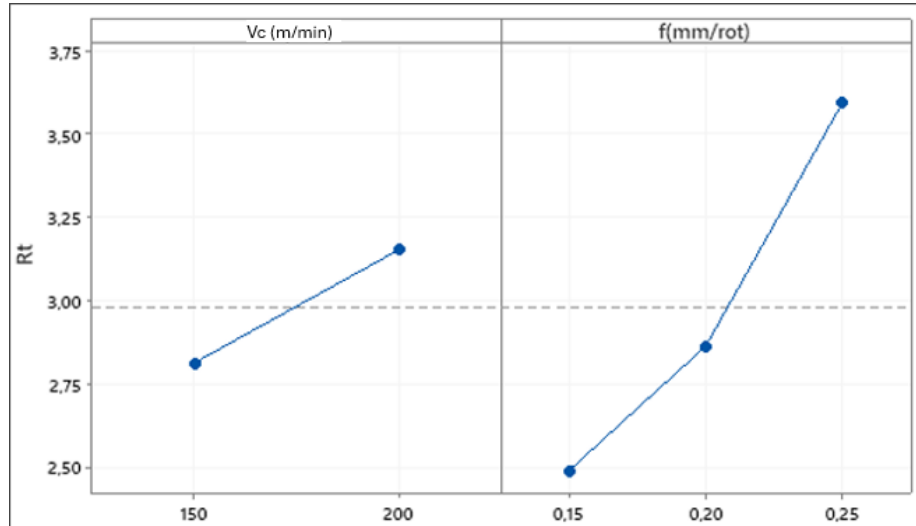
GL=Graus de Liberdade / SQA=Soma dos Quadrados Ajustada
/ MQA=Média dos Quadrados Ajustada

Fonte: Autor.

Pode-se perceber na figura 39 que o aumento dos valores dos parâmetros interferem de forma proporcional na rugosidade R_t , sendo o avanço o fator com maior sensibilidade, uma vez que a diferença dos valores da rugosidade R_t , é muito alta. Já visualizando na figura 40, pode-se comprovar isso, sendo que o gráfico mostra um padrão de comportamento para dois

diferentes avanços, somente o avanço mediano que teve uma brusca mudança, que possa ter ocorrido devido a fatores externos.

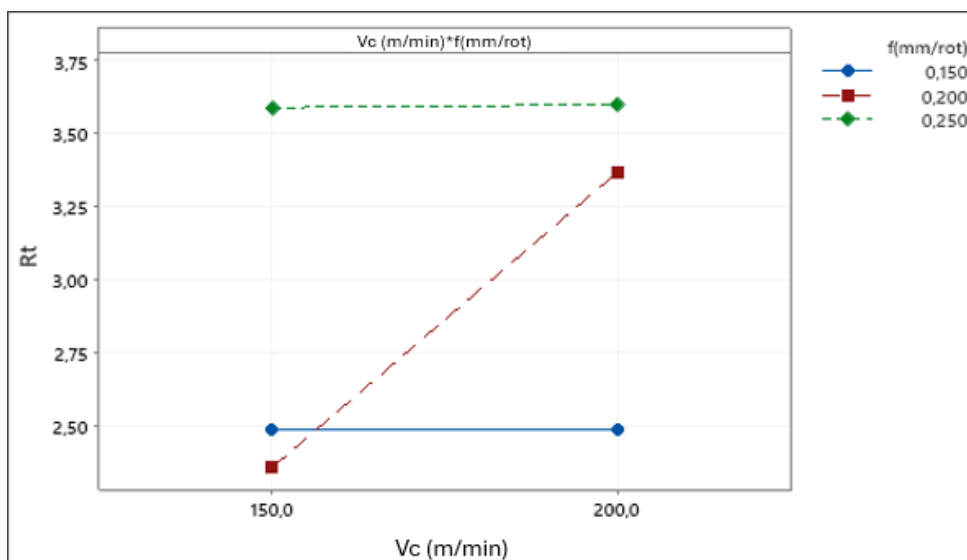
Figura 39 - Gráfico dos efeitos principais para rugosidade R_t



Fonte: Autor.

Já visualizando na figura 40, pode-se comprovar isso, sendo que o gráfico mostra um padrão de comportamento para dois diferentes avanços, somente o avanço mediano que teve uma brusca mudança, que possa ter ocorrido devido a fatores externos. Além disso, a velocidade de corte, não teve tanta influência, uma vez que as linhas que representam o avanço estão quase que horizontal, para somente dois dos casos, que esse comportamento se mantém.

Figura 40 - Gráfico das interações para rugosidade R_t



Fonte: Autor.

4.4.3 Rugosidade R_z

Por meio da análise dos resultados apresentados na Tabela 9, juntamente com a análise de variância, constatou-se uma influência significativa da velocidade de corte (V_c) e do avanço (f) na rugosidade R_z .

É evidente que os parâmetros analisados exerceram uma forte influência na rugosidade R_z , conforme indicado pelos valores de P próximos de zero, tanto para as variáveis isoladas quanto para suas interações. Pode-se concluir, adicionalmente, que esses fatores possuem uma significativa relevância estatística. Para uma melhor compreensão, as Figuras 41 e 42 ilustram esses resultados, facilitando a visualização da influência dos parâmetros na rugosidade R_z .

Pode-se observar que ambos os parâmetros analisados isoladamente apresentam relevância estatística significativa. Isso se deve ao fato de que os valores de R_z variam substancialmente a cada alteração nos parâmetros, indicando alta variabilidade. Essa variabilidade é evidenciada pela distância dos pontos em relação à linha pontilhada, que representa a média das médias dos valores registrados, tanto para a velocidade de corte quanto para o avanço, conforme ilustrado na Figura 41.

Tabela 9 - Análise de variância para os valores de rugosidade R_z

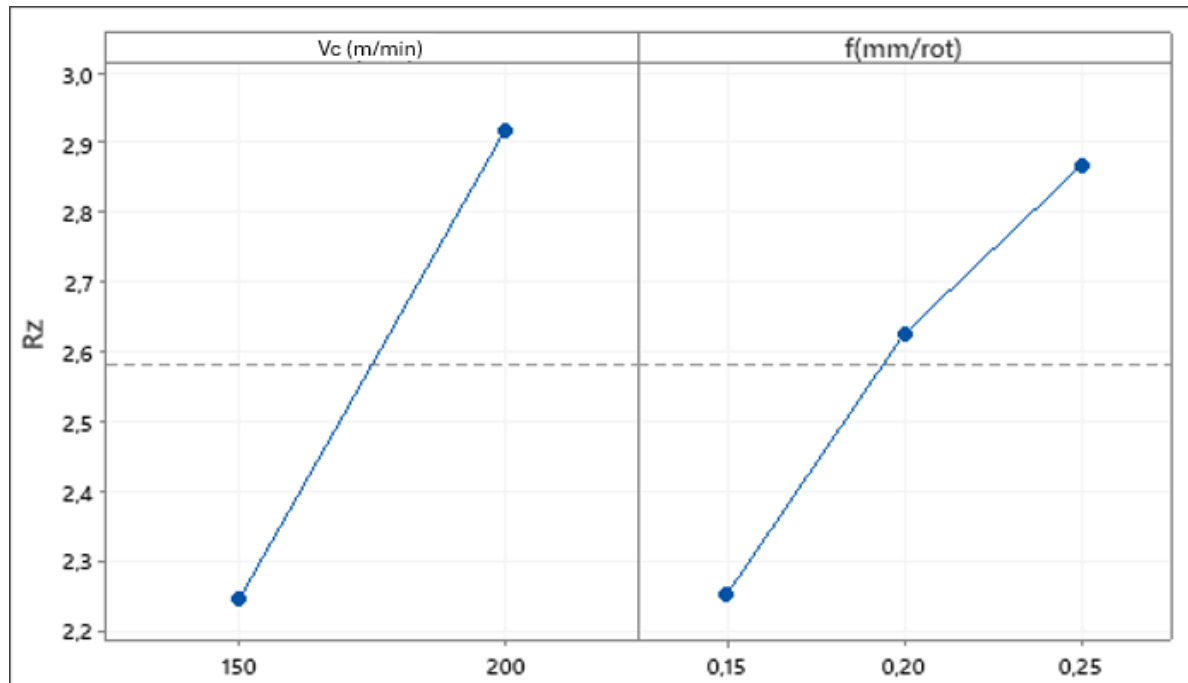
Fonte	GL	SQA	MQA	Valor F	Valor P
Modelo	5	4,1179	0,82358	12,13	0,000
Linear	3	3,1843	1,06144	15,64	0,000
V_c (m/min)	1	2,0268	2,02676	29,86	0,000
f (mm/rot)	2	1,1576	0,57879	8,53	0,005
Interações bidirecionais	2	0,9336	0,46680	6,88	0,010
V_c (m/min)* f (mm/rot)	2	0,9336	0,46680	6,88	0,010
Erro	12	0,8144	0,06787		
Total	17	4,9324			
GL=Graus de Liberdade / SQA=Soma dos Quadrados Ajustada / MQA=Média dos Quadrados Ajustada					

Fonte: Autor.

Analisando a figura 42, percebe-se que R_z tende a possuir bons valores de acabamento para velocidade de corte baixas, independentemente do avanço, porém por outro lado, com altos valores de velocidade de corte a rugosidade R_z sofre uma mudança brusca, para o caso de avanço mais altos, pois para o caso de um avanço mais baixo, obteve-se valores próximos como aqueles

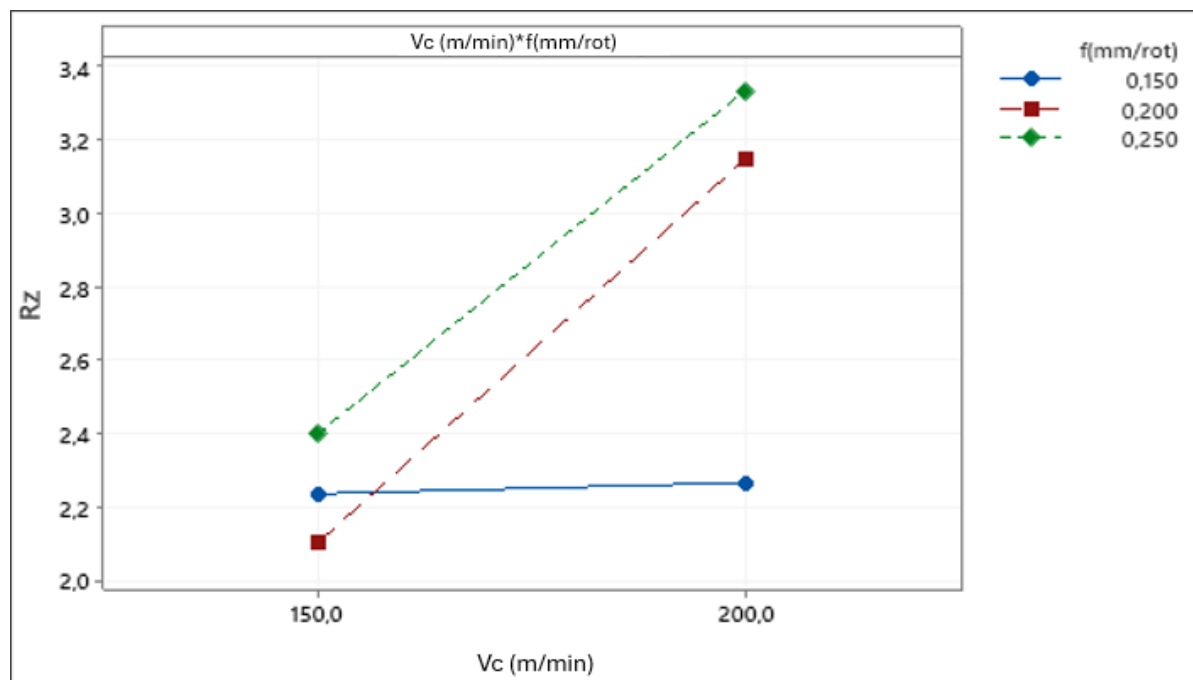
citados na velocidade de corte baixa.

Figura 41 - Gráfico dos efeitos principais para rugosidade R_z



Fonte: Autor.

Figura 42 - Gráfico das interações para rugosidade R_z



Fonte: Autor.

4.5 DESGATE DA FERRAMENTA E CAVACOS OBSERVADOS

Para a análise microscópica do desgaste da ferramenta, não foram verificados flancos muito acentuados. No entanto, um fator que foi bastante observado em todas as arestas de corte foi o material encrustado na ponta da ferramenta (APC). A Figura 43 mostra algumas medidas do desgaste de flanco encontradas, enquanto a Tabela 10 apresenta os parâmetros utilizados que resultaram nas fotos da Figura 43.

Já na figura 44, pode-se notar uma possível formação de APC's e lascamentos na ferramenta cerâmica utilizada. Foram encontrados pequenos lascamentos em todas as arestas utilizadas, porém a possível APC's, mostrada na figura 44, é apenas um material aderido no processo, dessa forma não se trata de uma aresta postiça de corte, uma vez que a rugosidade e os gráficos de potência não apresentaram as características de quando ocorre tal efeito. Apesar das avarias encontradas, a ferramenta suportou bem aos esforços aos quais foi submetida, uma prova disso, é a ausência de trincas nas imagens visualizadas no microscópio.

Além da análise da ferramenta cerâmica, os cavacos resultantes do processo de usinagem foram examinados sob o microscópio também. Foi constatado que, em todos os parâmetros utilizados, eles exibiram características semelhantes. Embora a Figura 45 represente apenas um cavaco, é importante destacar que os demais compartilham das mesmas características, conforme evidenciado pela homogeneidade identificada durante a análise microscópica, como ilustrado na mesma figura.

Tabela 10 – Relação de fotos e seus respectivos parâmetros.

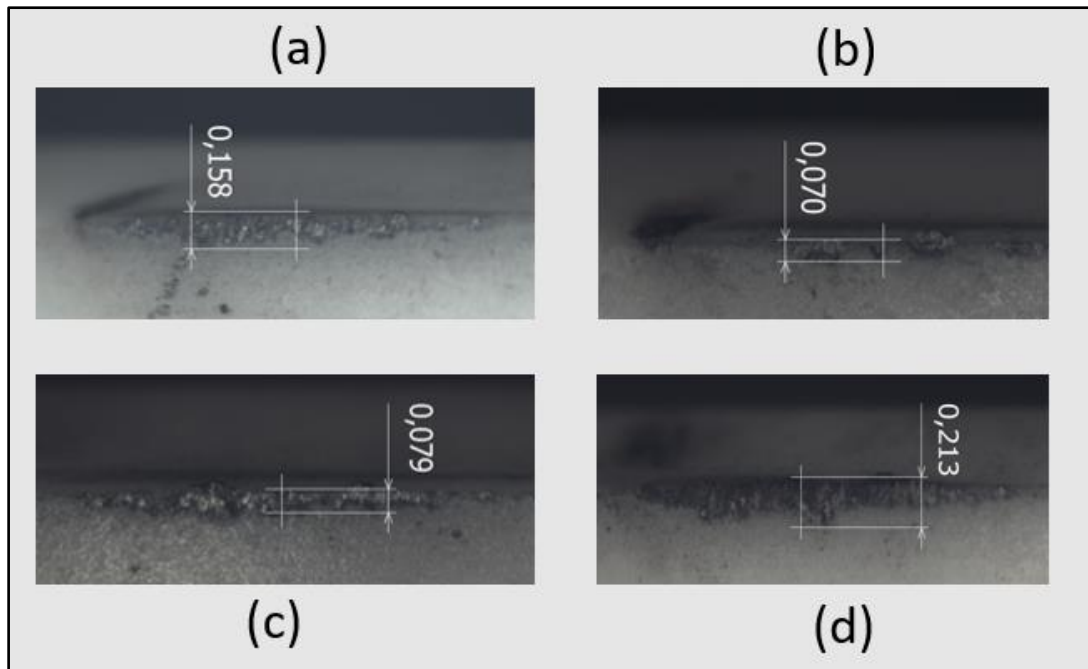
Figura	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Profundidade de Usinagem (mm)	Repetições	Vb (mm)
N/A	150	0,15	0,2	3	*
38 (b)	150	0,2	0,2	3	0,070
38 (b)	150	0,25	0,2	3	0,079
N/A	200	0,15	0,2	3	*
38 (a)	200	0,2	0,2	3	0,158
38 (a)	200	0,25	0,2	3	0,213

* Não foram encontrados desgastes para os parâmetros em questão.

Fonte: Autor.

Além da análise da ferramenta cerâmica, os cavacos resultantes do processo de usinagem foram examinados sob o microscópio também. Foi constatado que, em todos os parâmetros utilizados, eles exibiram características semelhantes.

Figura 43 – Desgaste de flanco encontrados (V_b).



Fonte: Autor.

É interessante destacar que os desgastes apresentados foram muito baixos em relação ao comprimento de corte que a ferramenta percorreu. O comprimento de corte (L_c) pode ser calculado pela equação 11:

$$L_c = (P_f/f) * (2 * \pi * D_p) * (n) \quad (11)$$

Onde:

P_f = percurso de avanço (30 mm),

f = avanço o qual varia entre 0,15 mm/rot, 0,2 mm/rot e 0,25 mm/rot;

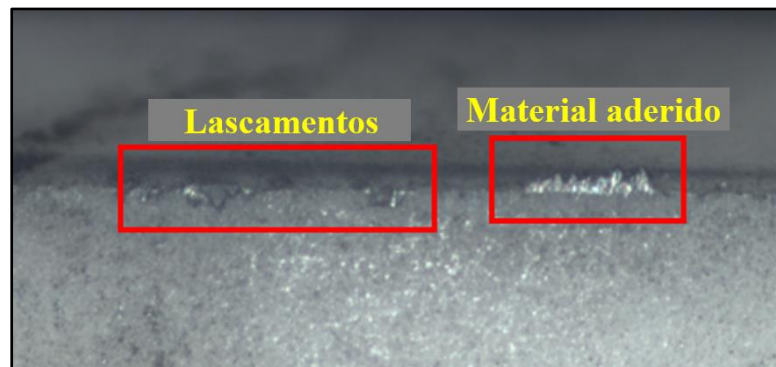
D_p = diâmetro da peça (50 mm),

n = número total de vezes que a operação foi realizada, que no caso 3 repetições.

Ao substituírmos os valores na fórmula, chegamos aproximadamente a um comprimento de corte variando entre 114 m e 189 m usinados, dependendo dos diferentes avanços utilizados. Portanto, ao considerarmos a proporção desses valores citados, o desgaste da ferramenta variou entre 0,070 mm e 0,213 mm, o que demonstra uma diferença muito grande quando comparado à magnitude dos valores citados.

Como mostrado na figura 45, e através dos conceitos apresentados anteriormente, o cavaco em questão pode ser classificado na forma como fita emaranhado e no tipo como parcialmente contínuo ou numa linguagem mais técnica do tipo cisalhado.

Figura 44 – Lascamentos e material aderido encontrados.



Fonte: Autor.

Figura 45 – Visualização macro e micro dos cavacos gerados.



Fonte: Autor.

Além, disso, a cor azulada do cavaco indica que as temperaturas durante o processo de usinagem foram muito altas.

5 CONCLUSÃO

Em uma análise abrangente, é notável que a ferramenta apresentou um desempenho satisfatório nos parâmetros empregados no processo de usinagem do aço 52100 endurecido. Considerando a elevada dureza do material, a ferramenta demonstrou valores reduzidos na medida V_b , indicativa do desgaste de flanco. Apesar de alguns lascamentos e presença de arestas postizas de corte, que podem impactar no acabamento, a ferramenta apresentou poucos inconvenientes nesse sentido.

Ao examinar os resultados referentes ao acabamento, observa-se que um ponto crucial destacado em todo o estudo é a consistência dos valores de acabamento. Mesmo diante das adversidades do processo, os números indicam um desvio aritmético médio do perfil em avaliação variando de aproximadamente 0,35 a 0,63 μm . Esses resultados são notáveis ao considerar a comparação com o processo de retificação, que possui uma ordem de 0,8 μm .

Essa constatação vale ressaltar a eficiência da ferramenta, tornando-a uma opção viável para a aplicação no processo de *Hard Turning*. A substituição do processo de retificação por este método não apenas contribui para a redução de custos, mas também acelera o processo de fabricação de peças em aço 52100, proporcionando um acabamento superficial de qualidade e eficiência aprimorada. Essa abordagem emerge como uma alternativa mais econômica, rápida e eficaz na produção de peças de alta qualidade.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se realizar uma análise aprofundada da vida útil da ferramenta utilizada no processo de usinagem do aço 52100 endurecido. Essa avaliação deve incluir a investigação do desempenho da ferramenta ao longo de um ciclo de vida completo, considerando não apenas o desgaste do flanco, mas também outros parâmetros que possam influenciar a durabilidade e a eficiência do processo. É fundamental explorar diferentes condições de usinagem, como variações nas velocidades de corte, tipos de avanço e condições de lubrificação, para identificar a configuração ótima que maximize a vida útil da ferramenta.

Além disso, a utilização de outros parâmetros, como avanço, velocidade de corte e profundidade de corte, pode oferecer uma visão mais abrangente sobre os fatores que afetam o desgaste da ferramenta. Análises detalhadas de cavacos e características do acabamento superficial também devem ser consideradas para entender melhor a relação entre os parâmetros de usinagem e a performance da ferramenta.

Não foi possível realizar o teste de normalidade e análise Tukey dos dados devido às limitações de tempo. Portanto, recomenda-se que estudos futuros incluam um teste de normalidade, permitindo que os dados sejam trabalhados de maneira mais rigorosa e que se aplique uma transformação, como Box-Cox, Johnson ou outras adequadas, para normalizar os dados, se necessário. Dessa forma, será possível aprimorar a análise e interpretação dos resultados.

Por meio dessas investigações, será possível não apenas aprimorar a seleção de ferramentas para o processo de *Hard Turning*, mas também contribuir para a formulação de diretrizes que potencializem a eficiência e a viabilidade econômica do processo, promovendo uma produção mais sustentável e de alta qualidade.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4287:2002**: especificações geométricas do produto (gps): rugosidade: método do perfil - termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4288:2008**: especificações geométricas do produto (gps): rugosidade: método do perfil — regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. . Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

AOUICI, H.; YALLESE, M. A.; CHAOUI, K.; MADROUKI, T.; RIGAL, J. F. Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: prediction model and cutting conditions optimization. **Measurement**, [s.l.], v. 45, p. 344-353, 2012.

BARSOUM, M. W. **Fundamentals of ceramics**. 3rd ed. New York: Taylor and Francis, 2003.

BUDINSKI, K. G. **Engineering materials**: properties and selection. 7th ed. Pearson Education, 2002.

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.

CALLISAYA, E. S. **Análise do processo de torneamento do aço AISI 4340 temperado e revenido através de ferramentas cerâmicas de Al₂O₃+MgO experimentais**. 2017. Tese (Livre-Docente em Usinagem dos Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/c613434f-c3d5-4a56-92f3-64686ae64841>. Acesso em: 16 nov. 2023.

CALLISAYA, E. S. **Machinability analysis of VAT 32® nickel-based superalloy using commercial and experimental milling inserts**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/15c89f7d-ab23-4143-b196-adb1a2316dc6>. Acesso em: 16 nov. 2023.

CATÁLOGO Técnico: Guia prático de aços e metais. **GGD Metals**, 2023. Disponível em: <https://www.ggdmetals.com.br/produtos/categoria/aco-construcao-mecanica>. Acesso em: 16 nov. 2023.

DUARTE, A. K. B. S. **Estudo da viabilidade de ferramentas cerâmicas experimentais de Al₂O₃+Cr₂O₃, Al₂O₃+MgO e Al₂O₃+Ni₂O₃ no torneamento do ferro fundido vermicular**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/0c2ca53a-e84f-4a87-95de-24f584f1a477>. Acesso em: 16 nov. 2023.

EVANGELISTA, G. S. *et al.* Efeito do desgaste da ferramenta na rugosidade do aço endurecido ABNT 52100 em um processo de torneamento. 2018. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 37., 2018, Maceió. **Proceedings** [...]. Maceió: Enegep, 2018. Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_259_487_35433.pdf. Acesso em: 05 jan. 2024.

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. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/057822ed-4496-4cd3-9a5f-045fc5e3704d>. Acesso em: 16 nov. 2023.

GAMA, R. P. **Estudo da formação do cavaco no torneamento de superligas de níquel**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia e Ciências, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/300dc225-eaf4-4cb9-8d88-a80170e667d8>. Acesso em: 20 nov. 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3685**: tool-life testing with single-point turning tools. 3rd ed. Geneva: ISO, 1993.

KIMINAMI, C. S.; CASTRO, W. B.; OLIVEIRA, M. F. de. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013. E- book. ISBN 9788521206835. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521206835/>. Acesso em: 31 dez. 2023.

KONDO, M. Y. *et al.* Recent advances in the use of Polyamide-based materials for the automotive industry. **Polímeros**,[s.l.], v. 32, n. 2, 2022.

KURT, A.; YALÇIN, B.; YILMAZ, N. The cutting tool stresses in finish turning of hardened steel with mixed ceramic tool. **The international journal of advanced manufacturing technology**, London, v. 80, p. 315-325, 2015.

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://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521208440/>. Acesso em: 01 jan. 2024.

MANUAL aços especiais: aços para construção mecânica. **Gerdau**, São Paulo, 2. ed., 2023. Disponível em: <https://mais.gerdau.com.br/catalogos-e-manuais?type=catalogos-e-manuais&cat=segmentos&s=a%C3%87OS+ESPECIAIS&segmento=Automotivo>. Acesso em: 16 nov. 2023.

MORRELL, R. Matrix materials. In: Kelly, A.; Zweben, C. (ed.). **Comprehensive composite materials**: carbon/carbon, cement, and ceramic matrix composites. Amsterdam: Elsevier, 2000, p. 1-24. v.4

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: 16 nov. 2023.

RAO, C. J.; RAO, D. N.; SRIHARI, P. Influence of cutting parameters on cutting force and surface finish in turning operation. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 64, p. 1405-1415, 2013.

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 e Ciências, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/cbd0e9ec-b01a-45ea-a406-0d1e96e35737>. Acesso em 20 nov. 2023.

RODRIGUES, G. A. S. **Torneamento do aço ABNT 52100 endurecido utilizando ferramentas experimentais cerâmicas $Al_2O_3+Cr_2O_3$ e Al_2O_3+MgO** . 2023. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia e Ciências, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/b0cdc261-adce-4f2d-8459-3758dd15e3cc/content>. Acesso em: 16 nov. 2023.

SANDVIK COROMANT. Fórmulas e definições de fresamento. **Sandvik coromant**, Jundiaí, [s.d.]. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx>. Acesso em: 16 nov. 2023.

SOUSA, T. A. **Usinagem de ferro fundido vermicular com ferramenta de corte a base alumina magnésio**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia e Ciências, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/412cdb43-31b2-41a7-a331-261b6231bde7>. Acesso em: 16 nov. 2023.

STEPAN, G. *et al.* Chatter avoidance in cutting highly flexible workpieces. **CIRP annals: manufacturing technology**, Inglaterra, v. 66, n. 1, 2017.

WANG, J.; STEVENS, R. Review zirconia-toughened alumina (ZTA) ceramics. **Journal of materials science**, Netherlands, v. 24, p. 3421-3440, 1989.

ANEXO A – GRÁFICOS DOS ENSAIOS

Este anexo visa complementar o relatório por meio de gráficos que representam as médias dos parâmetros monitorados ao longo dos ensaios. São apresentados os seguintes gráficos:

Emissão Acústica Média pelo Tempo: gráfico que ilustra a evolução do nível de emissão acústica média durante cada ensaio, permitindo identificar padrões de ruído e possíveis variações ao longo do tempo.

Vibração Média pelo Tempo: gráfico que exibe as variações de vibração média, auxiliando na análise do comportamento dinâmico do sistema sob diferentes condições de teste.

Potência Consumida Média pelo Tempo: gráfico que representa o consumo de potência média ao longo dos ensaios, essencial para a avaliação da eficiência energética e desempenho do sistema.

Esses gráficos foram organizados para facilitar a visualização dos dados e a análise comparativa entre os ensaios realizados.

A.1 ENSAIOS 1 A 3

Os parâmetros utilizados para cada ensaio estão descritos na Tabela A.1. Foram realizados três passes para os mesmos parâmetros, permitindo a obtenção de resultados mais consistentes e a avaliação da repetibilidade dos dados obtidos. Abaixo, a tabela A.1 apresenta os valores específicos adotados para cada variável monitorada.

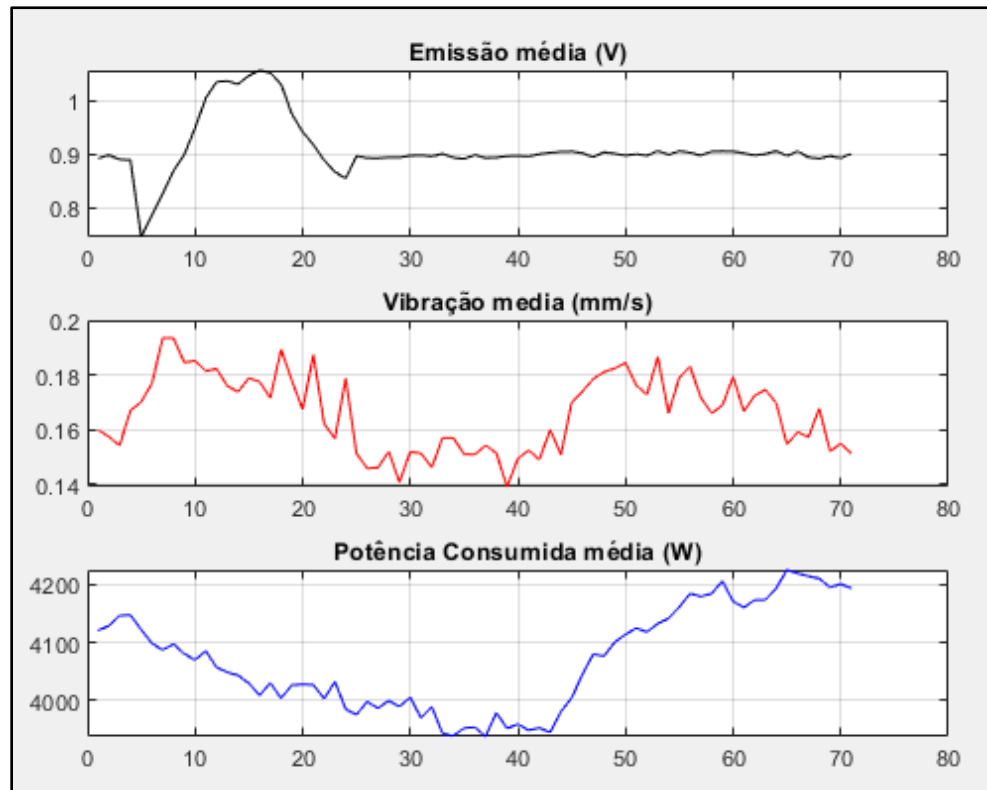
Tabela A.1 - Parâmetros utilizados nos ensaios 1 a 3

Ensaio	V_C (m/min)	Avanço (mm/rot)
1 a 3	150	0,15

Fonte: Autor

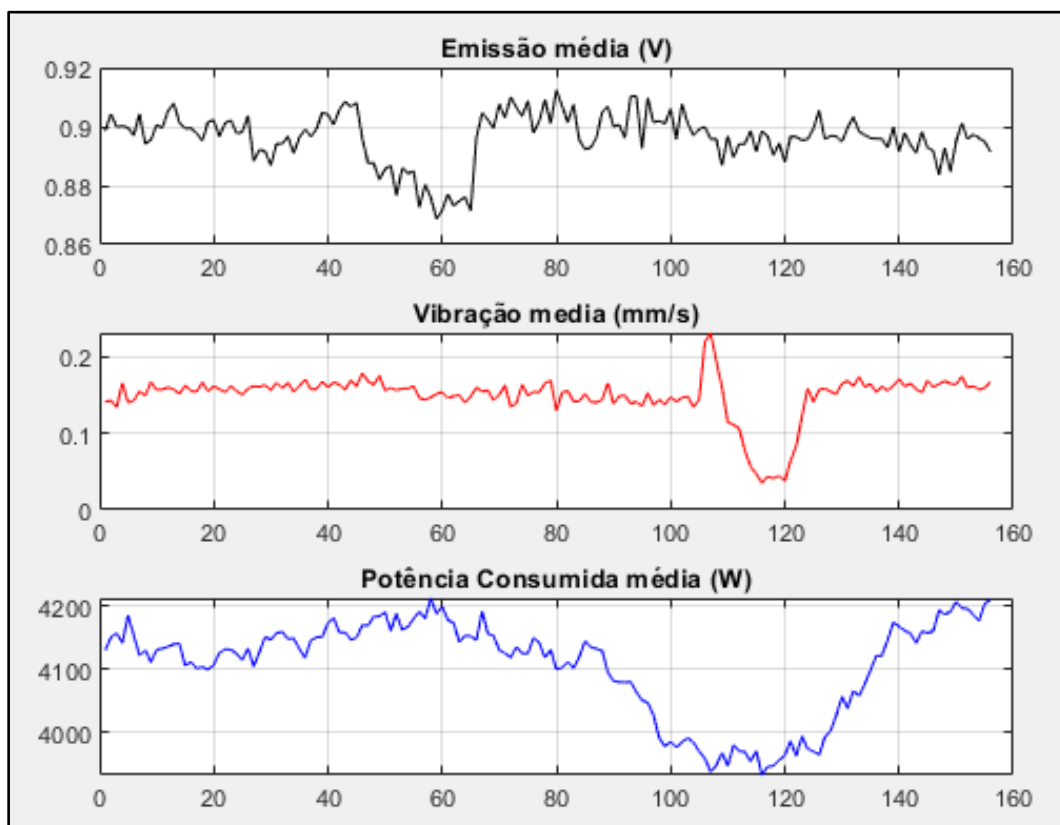
A seguir, são apresentadas as Figuras A.1, A.2 e A.3, que exibem os gráficos correspondentes aos parâmetros listados na Tabela A.1 e seus respectivos passes.

Figura A.1 - Gráficos pelo tempo ensaio 1 (1° Passe)



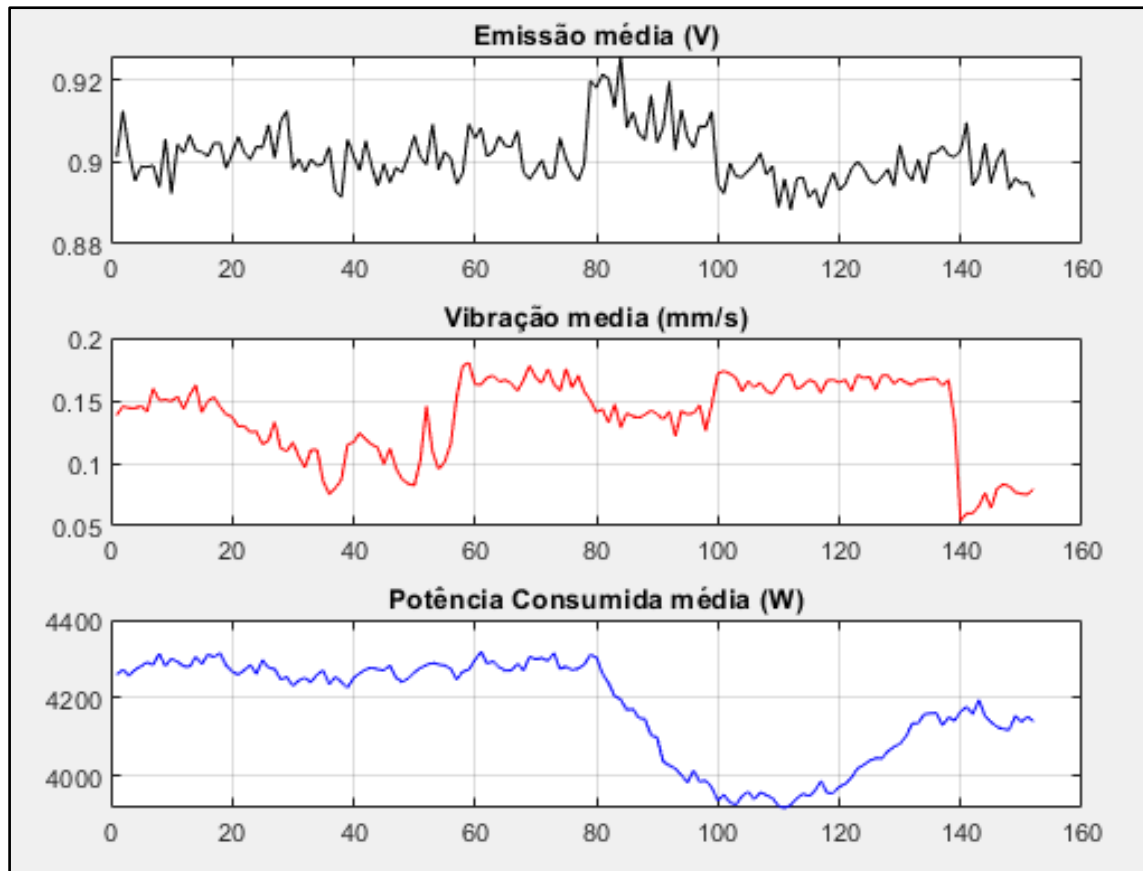
Fonte: Autor

Figura A.2 - Gráficos pelo tempo do ensaio 2 (2° Passe)



Fonte: Autor

Figura A.3 - Gráficos pelo tempo do ensaio 3 (3º Passe)



Fonte: Autor

A.2 ENSAIOS 4 A 6

Os parâmetros utilizados para cada ensaio estão descritos na Tabela A.2. Foram realizados três passes para os mesmos parâmetros, permitindo a obtenção de resultados mais consistentes e a avaliação da repetibilidade dos dados obtidos. Abaixo, a tabela A.2 apresenta os valores específicos adotados para cada variável monitorada.

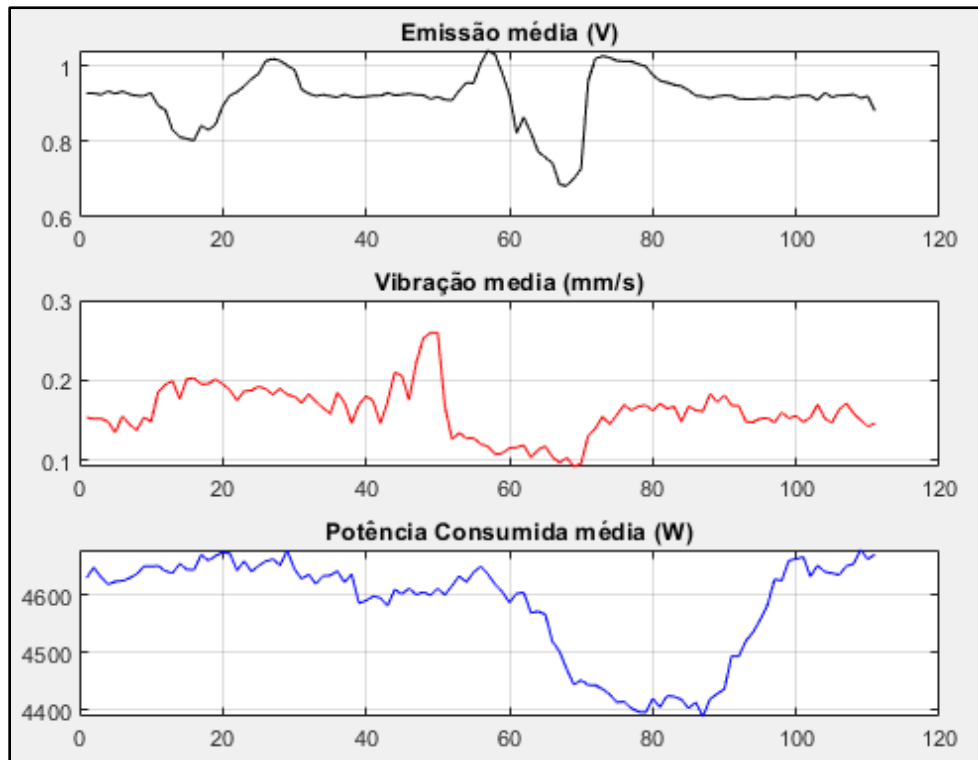
Tabela A.2 - Parâmetros utilizados nos ensaios 4 a 6.

Ensaio	V_C (m/min)	Avanço (mm/rot)
4 a 6	150	0,20

Fonte: Autor

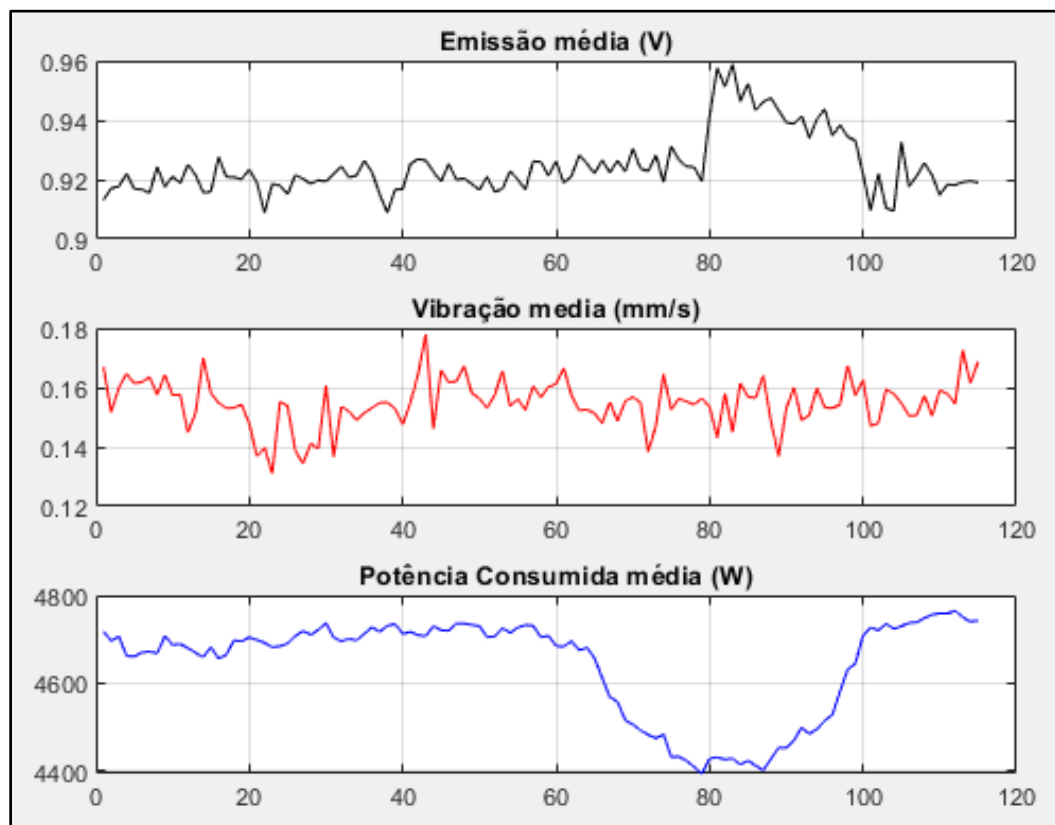
A seguir, são apresentadas as Figuras A.4, A.5 e A.6, que exibem os gráficos correspondentes aos parâmetros listados na Tabela A.2 e seus respectivos passes.

Figura A.4 - Gráficos pelo tempo do ensaio 4 (1° Passe)



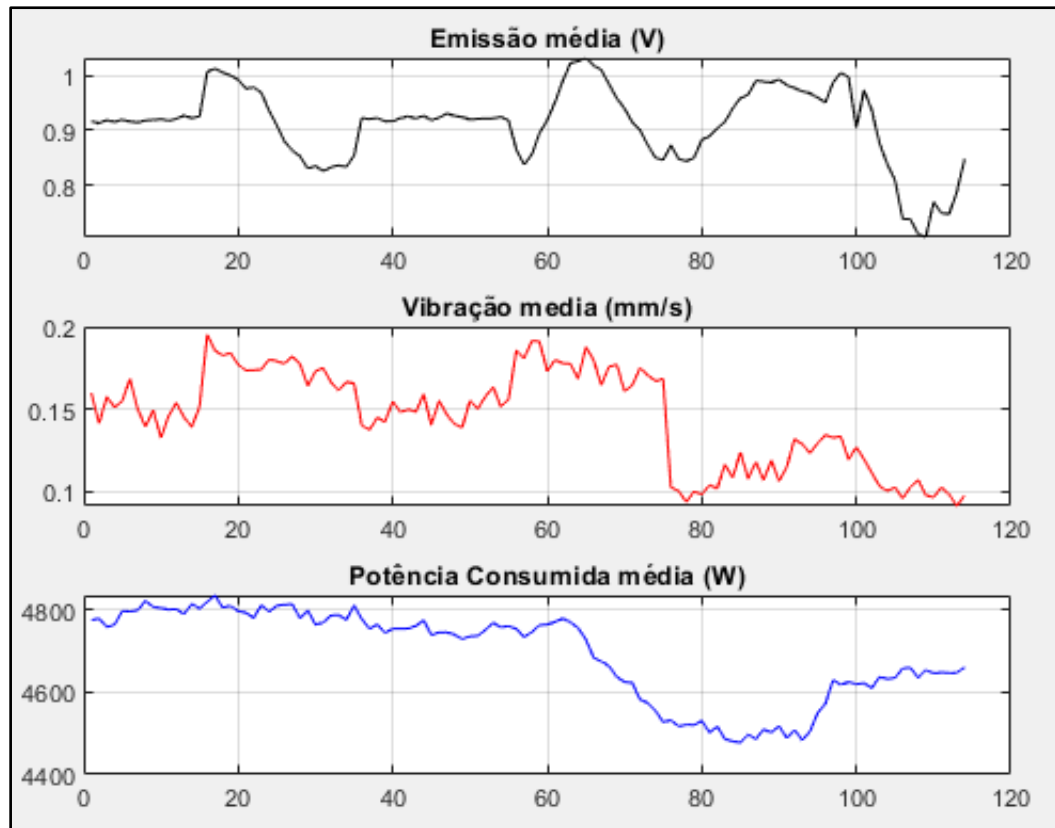
Fonte: Autor

Figura A.5 - Gráficos pelo tempo do ensaio 5 (2° Passe)



Fonte: Autor

Figura A.6 - Gráficos pelo tempo do ensaio 6 (3° Passe)



Fonte: Autor

A.3 ENSAIOS 7 A 9

Os parâmetros utilizados para cada ensaio estão descritos na Tabela A.3. Foram realizados três passes para os mesmos parâmetros, permitindo a obtenção de resultados mais consistentes e a avaliação da repetibilidade dos dados obtidos. Abaixo, a tabela A.3 apresenta os valores específicos adotados para cada variável monitorada.

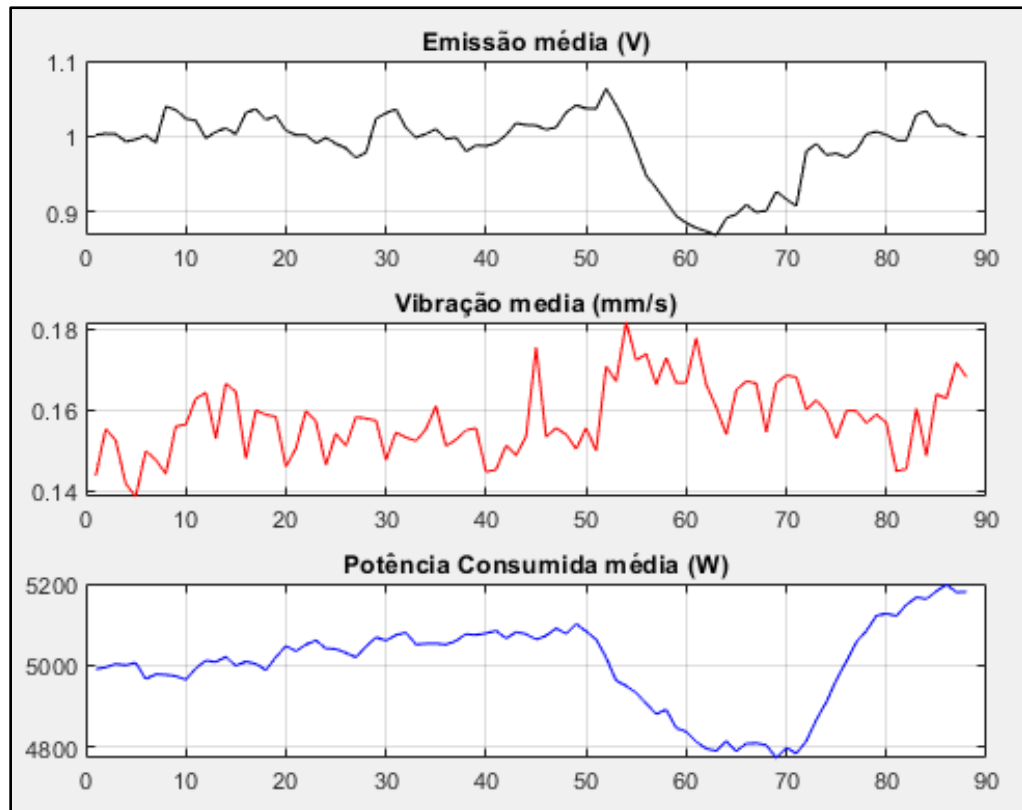
Tabela A.3 - Parâmetros utilizados nos ensaios 7 a 9.

Ensaio	V_C (m/min)	Avanço (mm/rot)
7 a 9	150	0,25

Fonte: Autor

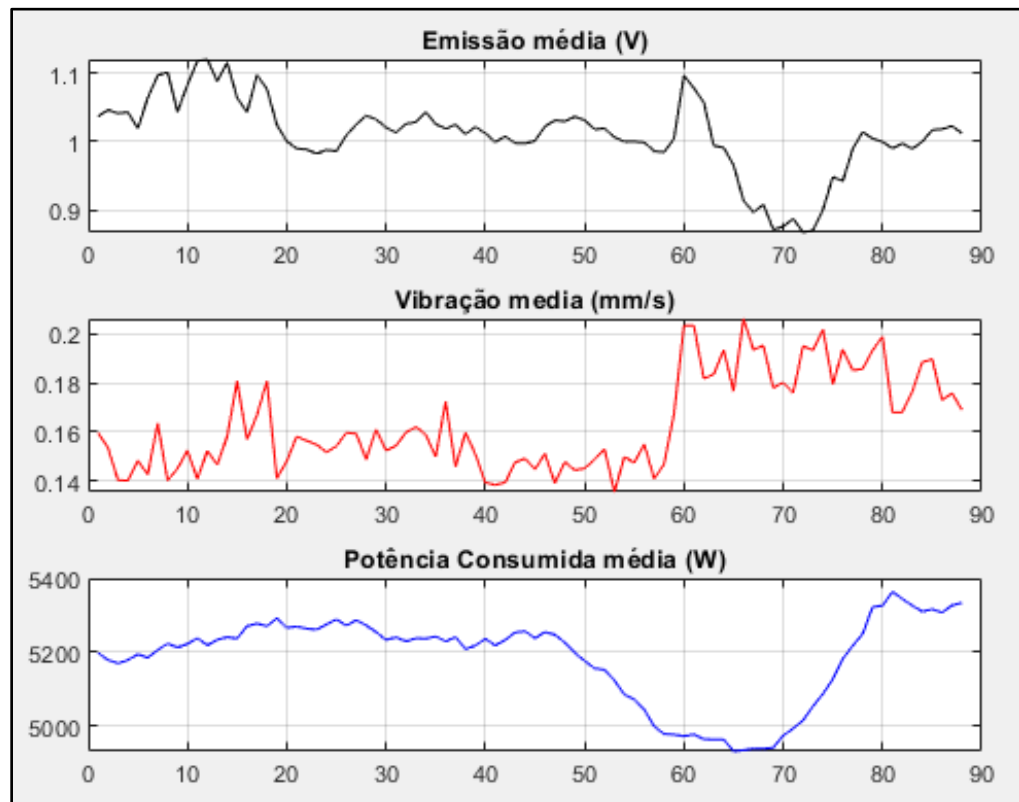
A seguir, são apresentadas as Figuras A.7, A.8 e A.9, que exibem os gráficos correspondentes aos parâmetros listados na Tabela A.3 e seus respectivos passes.

Figura A.7 - Gráficos pelo tempo do ensaio 7 (1° Passe)



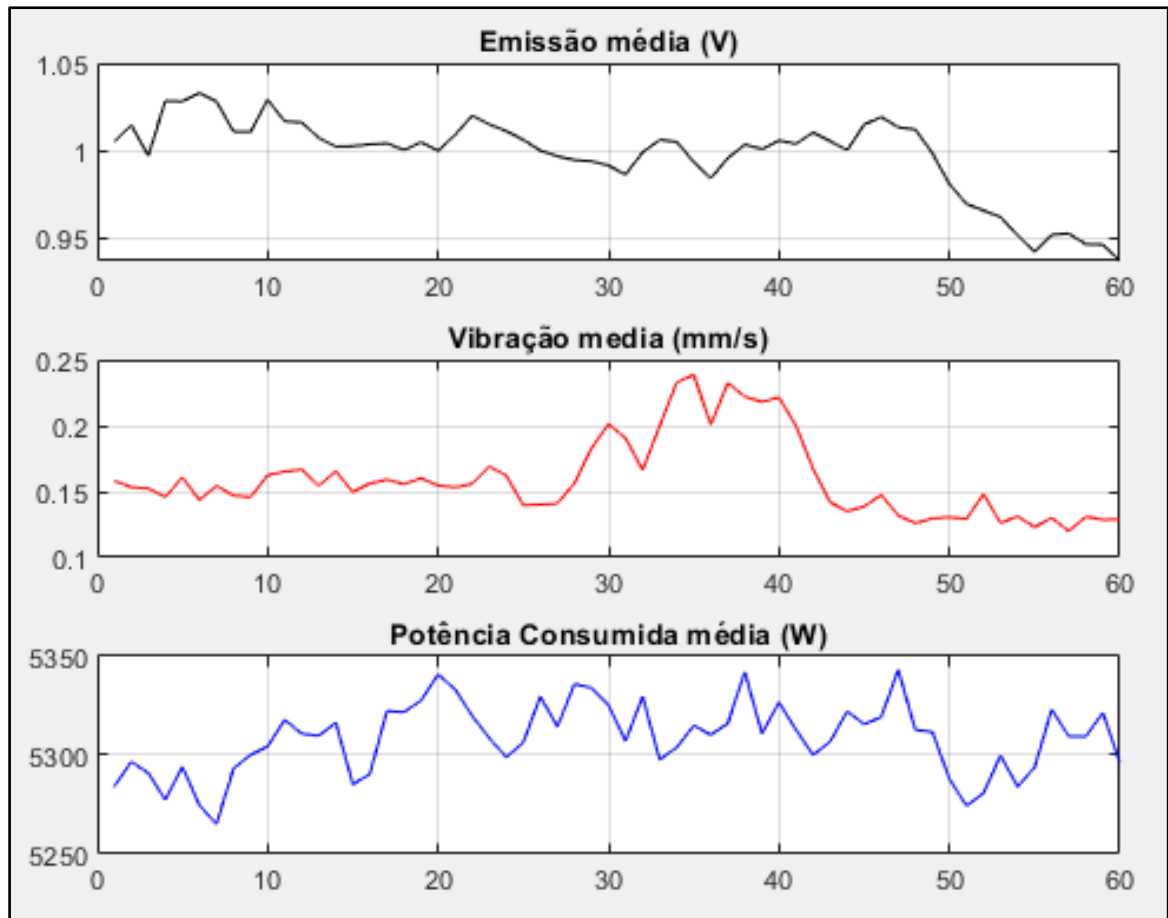
Fonte: Autor

Figura A.8 - Gráficos pelo tempo do ensaio 8 (2° Passe)



Fonte: Autor

Figura A.9 - Gráficos pelo tempo do ensaio 9 (3º Passe)



Fonte: Autor

A.4 ENSAIOS 10 A 12

Os parâmetros utilizados para cada ensaio estão descritos na Tabela A.4. Foram realizados três passes para os mesmos parâmetros, permitindo a obtenção de resultados mais consistentes e a avaliação da repetibilidade dos dados obtidos. Abaixo, a tabela A.4 apresenta os valores específicos adotados para cada variável monitorada.

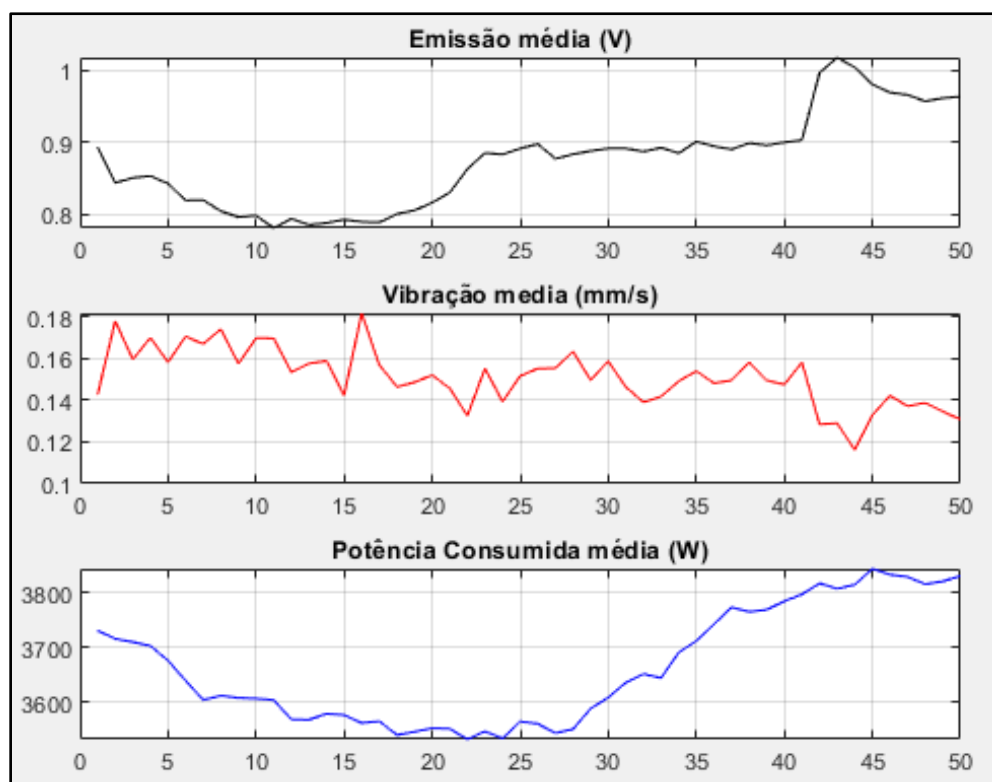
Tabela A.4 - Parâmetros utilizados nos ensaios 10 a 12.

Ensaio	V_C (m/min)	Avanço (mm/rot)
10 a 12	200	0,15

Fonte: Autor

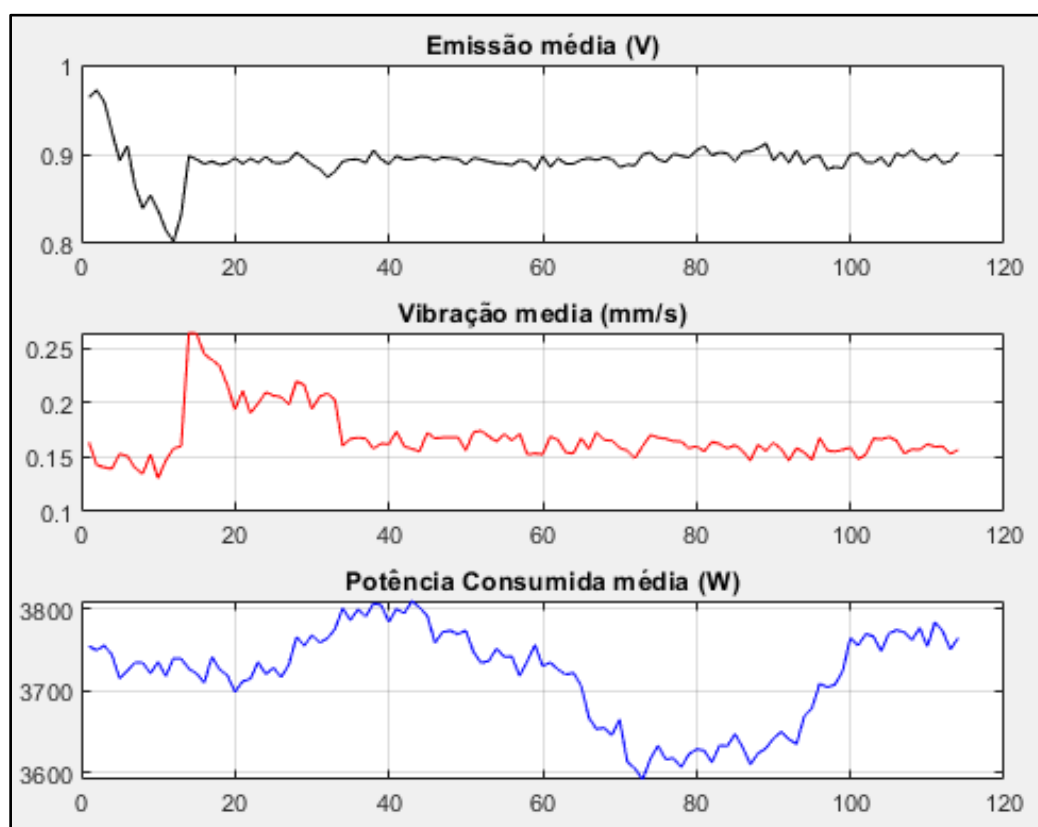
A seguir, são apresentadas as Figuras A.10, A.11 e A.12, que exibem os gráficos correspondentes aos parâmetros listados na Tabela A.4 e seus respectivos passes.

Figura A.10 - Gráficos pelo tempo do ensaio 10 (1º Passe)



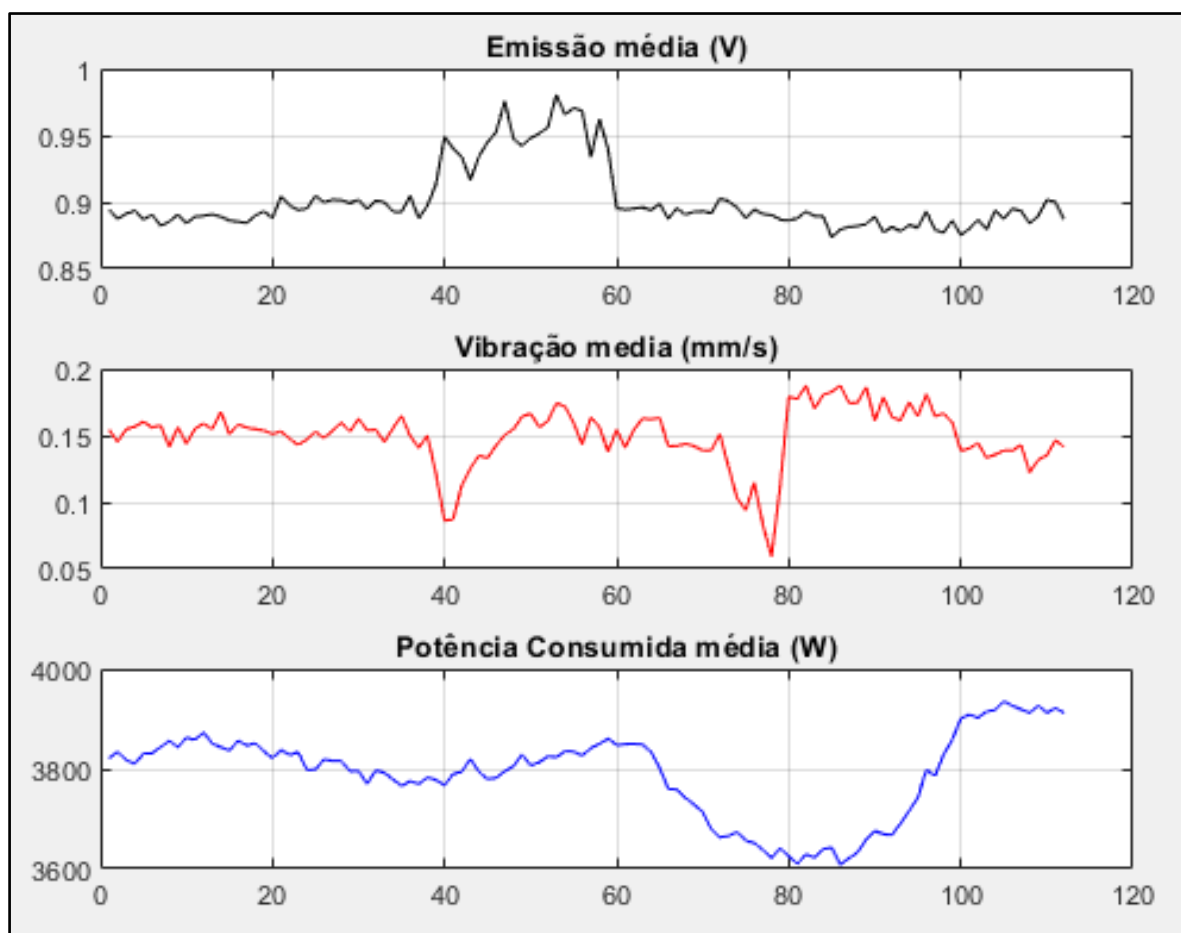
Fonte: Autor

Figura A.11 - Gráficos pelo tempo do ensaio 11 (2º Passe)



Fonte: Autor

Figura A.12 - Gráficos pelo tempo do ensaio 12 (3º Passe)



Fonte: Autor

A.5 ENSAIOS 13 A 15

Os parâmetros utilizados para cada ensaio estão descritos na Tabela A.5. Foram realizados três passes para os mesmos parâmetros, permitindo a obtenção de resultados mais consistentes e a avaliação da repetibilidade dos dados obtidos. Abaixo, a tabela A.5 apresenta os valores específicos adotados para cada variável monitorada.

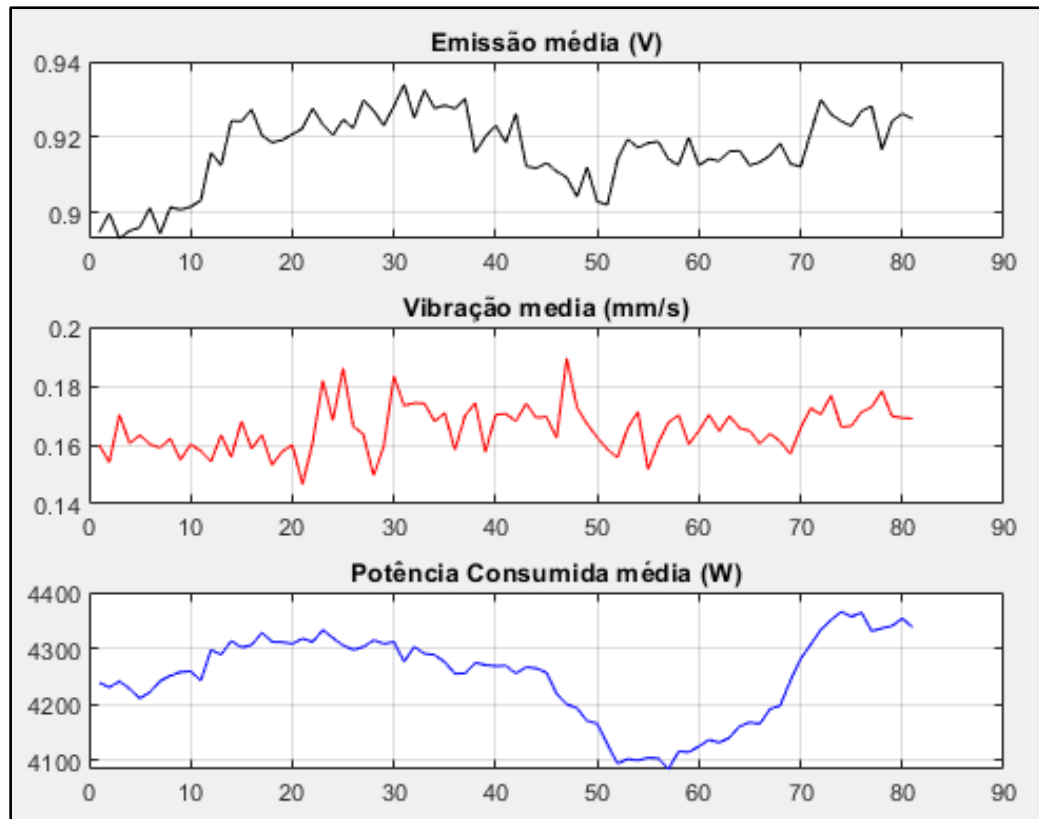
Tabela A.5 - Parâmetros utilizados nos ensaios 13 a 15.

Ensaio	V_C (m/min)	Avanço (mm/rot)
13 a 15	200	0,20

Fonte: Autor

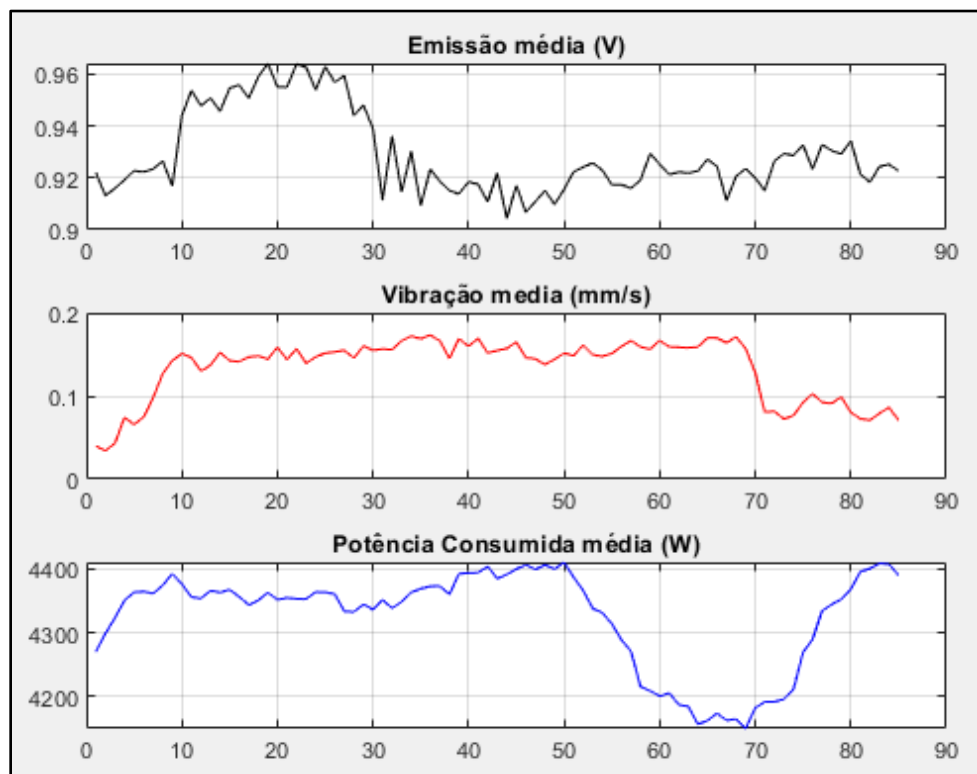
A seguir, são apresentadas as Figuras A.13, A.14 e A.15, que exibem os gráficos correspondentes aos parâmetros listados na Tabela A.5 e seus respectivos passes.

Figura A.13 - Gráficos pelo tempo do ensaio 13 (1º Passe)



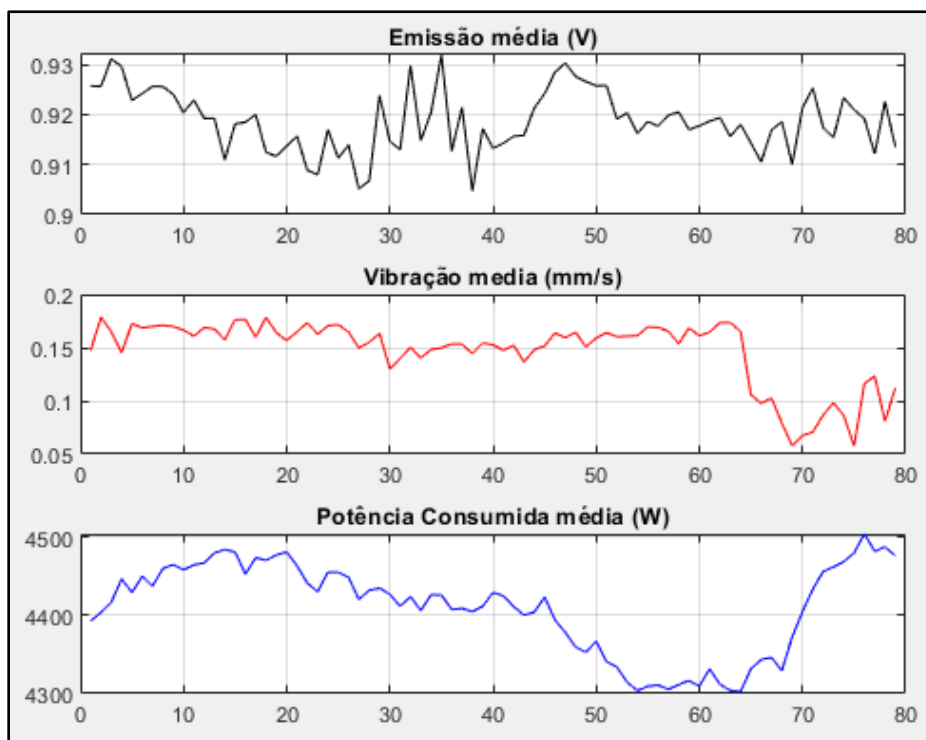
Fonte: Autor

Figura A.14 - Gráficos pelo tempo do ensaio 14 (2º Passe)



Fonte: Autor

Figura A.15 - Gráficos pelo tempo do ensaio 15 (3º Passe)



Fonte: Autor

A.6 ENSAIOS 16 A 18

Os parâmetros utilizados para cada ensaio estão descritos na Tabela A.6. Foram realizados três passes para os mesmos parâmetros, permitindo a obtenção de resultados mais consistentes e a avaliação da repetibilidade dos dados obtidos. Abaixo, a tabela A.6 apresenta os valores específicos adotados para cada variável monitorada.

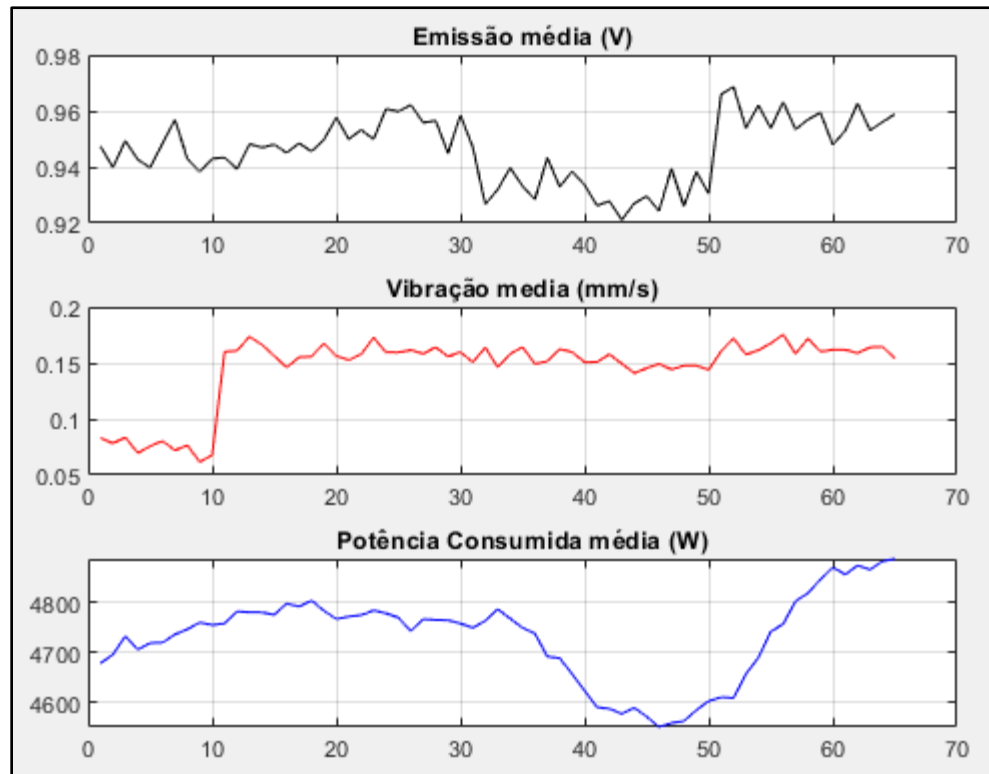
Tabela A.6 - Parâmetros utilizados nos ensaios 16 a 18.

Ensaio	V_C (m/min)	Avanço (mm/rot)
16 a 18	200	0,25

Fonte: Autor

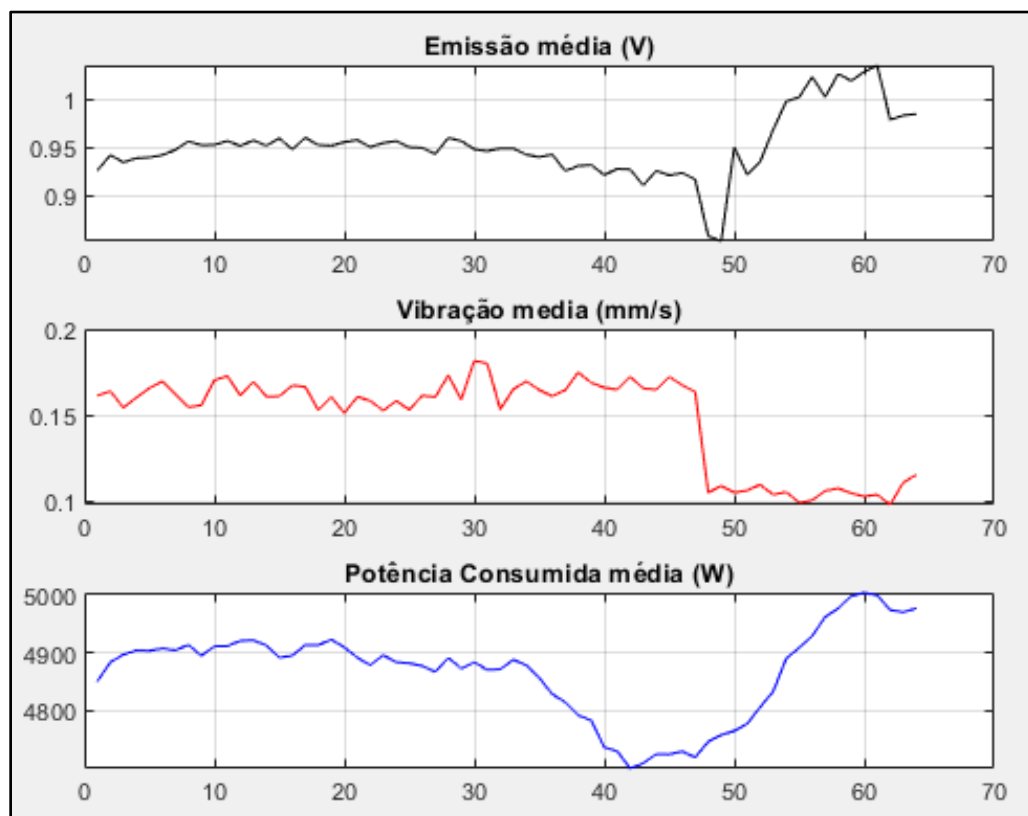
A seguir, são apresentadas as Figuras A.16, A.17 e A.18, que exibem os gráficos correspondentes aos parâmetros listados na Tabela A.6 e seus respectivos passes.

Figura A.16 - Gráficos pelo tempo do ensaio 16 (1º Passe)



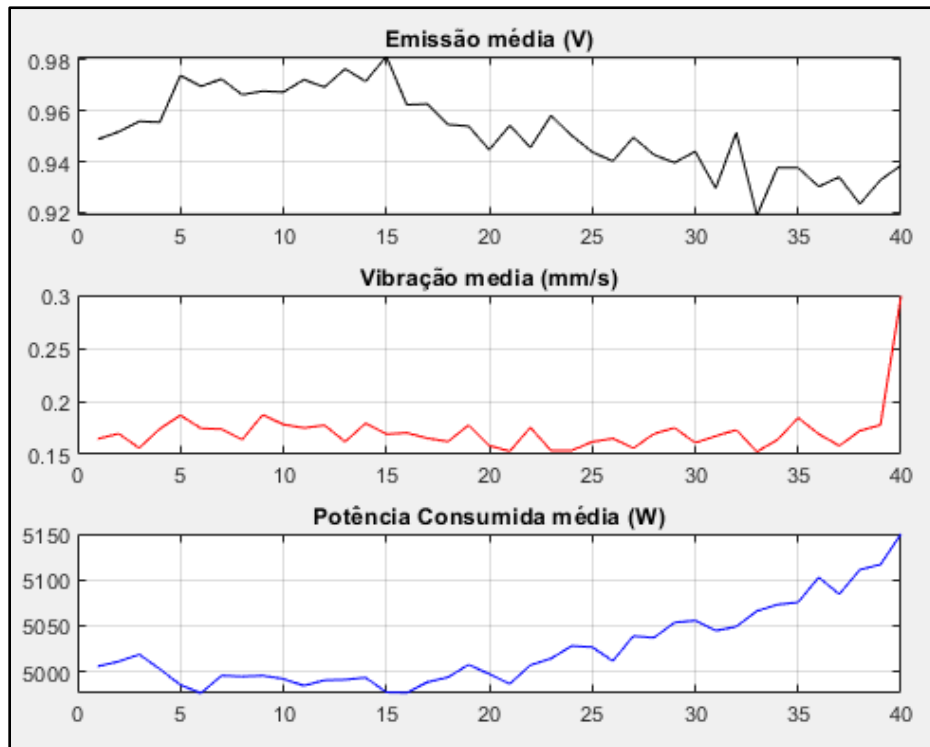
Fonte: Autor

Figura A.17 - Gráficos pelo tempo do ensaio 17 (2º Passe)



Fonte: Autor

Figura A.18 - Gráficos pelo tempo do ensaio 18 (3º Passe)



Fonte: Autor