

Nathan Mesquita Lima

**Aplicação de ferramenta de corte à base de alumina dopada com óxido de magnésio
no torneamento de ferro fundido nodular**

Guaratinguetá
2024

Nathan Mesquita Lima

**Aplicação de ferramenta de corte à base de alumina dopada com óxido de magnésio
no torneamento de ferro fundido nodular**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcel Yuzo Kondo
Coorientador: Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza

Guaratinguetá
2024

| | |
|-------|---|
| L732a | <p>Lima, Nathan Mesquita</p> <p>Aplicação da ferramenta de corte à base de alumina dopada com óxido de magnésio no torneamento de ferro fundido nodular / Nathan Mesquita Lima - Guaratinguetá, 2024.</p> <p>80 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 74-80</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2024.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Marcel Yuzo Kondo</p> <p>Coorientador: Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza</p> <p>1. Material cerâmico. 2. Usinagem. 3. Taguchi - Métodos (Controle de qualidade) 4. Ferramentas de corte. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 620.1</p> |
|-------|---|




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

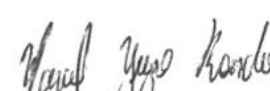
NATHAN MESQUITA LIMA

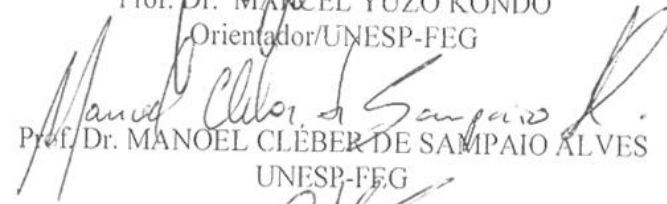
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAS"

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


Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCEL YUZO KONDO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES
UNESP-FEG


Me. Engª. EMANUELE SCHNEIDER CALLISAYA
UNESP-FEG

Dedido este meu trabalho primeiramente ao meu Deus e Salvador, a minha família e também a minha igreja, todos esses foram essenciais para perseverar e incentivar a concluir esse capítulo da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao meu Deus, aquele que transformou completamente a minha vida, me trouxe para a sua salvação e luz, e me concedeu capacidade, sabedoria, conhecimento, ânimo e perseverança para a realização deste trabalho para a glória d'Ele.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcel Yuzo, que se mostrou não apenas um orientador, mas também um amigo, foi extremamente atencioso, esclareceu diversas dúvidas durante o percurso, me ensinou diversos conceitos e me inspirou com seu amor pelo desenvolvimento científico. Um grande exemplo como professor, cientista, orientador e pessoa.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. José Vitor de Candido de Souza FEG/UNESP, que sempre se mostrou solícito, esclareceu vários conceitos sobre ciência dos materiais e me orientou desde o início da pesquisa.

Agradeço também ao Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio e a Emanuele Schneider Callisaya FEG/UNESP, que também me ajudaram durante os ensaios, no desenvolvimento no trabalho e nos possíveis caminhos para trilhar na pesquisa.

Aos docentes da FEG, que foram fundamentais para o meu conhecimento das diversas áreas exploradas neste estudo.

E a todos os técnicos administrativos, funcionários da biblioteca, coordenação do curso e secretária, por toda a orientação durante as etapas deste trabalho.

“Tudo o que fizerem, façam de todo o
coração, como para o Senhor.” Cl 3:23
Apóstolo Paulo

RESUMO

O desenvolvimento e aprimoramento de diversos materiais têm gerado diversas demandas no contexto da usinagem, onde, em um mercado altamente competitivo, é crucial priorizar a qualidade dos processos de fabricação, visar a máxima produtividade, a redução de custos e dar atenção à sustentabilidade. Dentro desse cenário, surge a necessidade de aprimoramentos do processo de usinagem de um material cada vez mais utilizado na indústria automotiva: o ferro fundido nodular. Uma das ferramentas de corte que tem ganhado notoriedade na usinagem desse material é a cerâmica à base de alumina, especialmente devido às suas propriedades únicas, como inércia química, alta resistência ao desgaste e dureza a quente. Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho da ferramenta cerâmica à base de alumina (Al_2O_3) dopada com óxido de magnésio (MgO), fabricada em escala laboratorial, no torneamento à seco do ferro fundido nodular de matriz ferrítica/perlítica. Os parâmetros de corte empregados foram velocidade de corte entre 350, 450 e 550 m/min, avanço de 0,10, 0,15 e 0,20 mm/rev e profundidade de corte de 0,25, 0,5 e 0,75 mm. Através de um arranjo ortogonal de Taguchi como planejamento experimental, investigou-se os efeitos dos parâmetros de corte (V_c , f , a_p) nas variáveis de saída de rugosidade R_a e R_t , desgaste de flanco (V_b), potência média e máxima, vibração média e máxima, e emissão acústica média e máxima. Em geral, a ferramenta de corte apresentou melhores desempenhos na velocidade de corte mais elevada de 550 m/min sendo a condição ideal, em relação ao desgaste de flanco de $V_c=550$ m/min, $f=0,15$ mm/rev e $a_p=0,25$ mm, resultando em V_b de 0,083 mm. O desgaste predominante foi de flanco, com alguns casos de entalhe, sendo o mecanismo de desgaste abrasivo o mais expressivo. A ferramenta cerâmica utilizada demonstrou um desempenho superior em relação às variáveis de resposta analisadas no mais alto nível de velocidade de corte (550 m/min) e apresentou R_a médio de 1,14 μm , e R_t médio de 9,53 μm .

PALAVRAS-CHAVE: ferramentas cerâmicas; usinagem à seco; ferro fundido nodular; método de Taguchi.

ABSTRACT

The advancement and refinement of different materials have created various requirements in machining. In a highly competitive market, it is vital to focus on the quality of manufacturing processes, strive for maximum productivity, reduce costs, and ensure sustainability. In this context, there is a need to enhance the machining process of nodular cast iron, which is increasingly being used in the automotive industry. Alumina-based ceramics have gained notoriety in machining due to their unique properties, such as chemical inertness, high wear resistance, and hot hardness. This study aimed to evaluate the performance of a laboratory-scale manufactured ceramic tool made of alumina (Al_2O_3) doped with magnesium oxide (MgO) during dry turning of nodular cast iron with a ferritic/pearlitic matrix. The cutting parameters used were cutting speed between 350, 450, and 550 m/min, feed of 0.10, 0.15, and 0.20 mm/rev, and depth of cut of 0.25, 0.5, and 0.75mm. An Taguchi's orthogonal arrangement was used as an experimental design to study the influence of different cutting parameters (V_c , f , a_p) on various output variables such as roughness (R_a and R_t), flank wear (V_b), average and maximum power, vibration average and maximum, and average and maximum acoustic emission. In general, the cutting tool performed better at the highest cutting speed, being the ideal condition of $V_c=550$ m/min, $f=0.15$ mm/rev, and $a_p=0.25$ mm, resulting in tool flank wear V_b of 0.083 mm. The predominant wear was on the flank, with some cases of notching, with the abrasive wear mechanism being the most significant. The ceramic tool utilized demonstrated better performance regarding the analyzed response variables at the highest level of cutting speed (550 m/min) and anifested a mean R_a of 1.14 μm and a mean R_t of 9.53 μm .

KEYWORDS: ceramic cutting tools; dry-machining; Nodular Cast Iron; Taguchi's method.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Ferro Fundido Cinzento, Vermicular e Nodular e suas estruturas..... | 19 |
| Figura 2 – Principais tipos de torneamento | 22 |
| Figura 3 – Torneamento Longitudial Externo | 22 |
| Figura 4 – Movimento e velocidades associados ao processo de torneamento..... | 23 |
| Figura 5 – Parâmetros de corte associados ao processo de torneamento. | 24 |
| Figura 6 – Principais parâmetros relacionados a rugosidade. | 28 |
| Figura 7 – Desgaste de cratera, de flanco e entalhe em ferramenta cerâmica..... | 31 |
| Figura 8 – Fluxograma das principais etapas do processo | 36 |
| Figura 9 – Ferramenta cerâmica de Al ₂ O ₃ +MgO..... | 37 |
| Figura 10 - Micrografia da ferramenta cerâmica de Al ₃ O ₂ (99,5%) dopada com MgO (0,5%)..... | 38 |
| Figura 11–Tarugo do ferro fundido nodular utilizado nos ensaios | 38 |
| Figura 12 – Centro de Torneamento CNC marco Romi Modelo GL240M. | 39 |
| Figura 13 - Rugosímetro portátil Marsurf M300..... | 41 |
| Figura 14 - Exemplo de gráfico mostrando a região de potência em vazio e região de corte efetivo entre peça e ferramenta..... | 42 |
| Figura 15 - Exemplo dos gráficos gerados pelo programa de tratamento de dados feito com o software MATLAB® do Ensaio 1 para Emissão Acústica, Vibração e Potência Máxima..... | 43 |
| Figura 16 - Mitutoyo Quick Scope QS-LZB serie. 359 | 44 |
| Figura 17 - Análise dos efeitos principais para as média e sinal ruído para rugosidade Ra..... | 46 |
| Figura 18 – Análise dos efeitos principais para as média e sinal ruído para rugosidade Rt..... | 47 |
| Figura 19 – Análise dos efeitos principais para as média e sinal ruído para desgaste de flanco máximo (Vb max)..... | 51 |
| Figura 20 – Análise dos efeitos principais para as média e sinal ruído para potência média de usinagem..... | 54 |
| Figura 21 – Análise dos efeitos principais para as média e sinal ruído para potência máxima de corte..... | 56 |
| Figura 22 – Análise dos efeitos principais para as médias e sinal ruído para vibração média..... | 58 |

| | |
|---|----|
| Figura 23 – Análise dos efeitos principais para as média e sinal ruído para vibração máxima..... | 60 |
| Figura 24 - Análise dos efeitos principais para as média e sinal ruído para emissão acústica média..... | 62 |
| Figura 25 - Análise dos efeitos principais para as média e sinal ruído para emissão acústica máxima..... | 65 |
| Figura 26 - Desgaste de flanco na condição de avanço de 0,15 mm/rot, velocidade de corte de 550 m/min e profundidade de corte de 0,25mm em ferramenta de corte cerâmica... .. | 68 |
| Figura 27 – Desgaste de flanco na condição de avanço de 0,10 mm/rev, velocidade de corte de 450 m/min e profundidade de corte de 0,05mm em ferramenta de corte cerâmica..... | 68 |
| Figura 28 - Lascamento em área de ferramenta cerâmica em ensaio na condição avanço de 0,10mm/rev, velocidade de corte de 450 mm/min e profundidade de corte de 0,75mm | 69 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Principais propriedades da ferramenta de corte de alumina dopada com óxido de magnésio..... | 37 |
| Tabela 2 – Variáveis medidas e equipamentos associados..... | 40 |
| Tabela 3 - Matriz de experimento do arranjo ortogonal de Taguchi L_9 para o ensaio de inserto cerâmico de alumina..... | 44 |
| Tabela 4 – ANOVA das médias para rugosidade R_a | 48 |
| Tabela 5 - ANOVA de S/N para rugosidade R_a | 48 |
| Tabela 6 – Análise de variância ANOVA das médias para Rugosidade R_t | 48 |
| Tabela 7 - Análise de variância ANOVA das médias para Rugosidade R_t | 48 |
| Tabela 8 - Teste de Tukey para os fatores com relação a variável resposta R_a | 49 |
| Tabela 9 - Teste de Tukey para os fatores com relação a variável resposta R_t | 49 |
| Tabela 10 – Análise de variância ANOVA para médias do desgaste de flanco máximo. ... | 52 |
| Tabela 11 – Análise de variância ANOVA para S/N do desgaste de flanco máximo..... | 52 |
| Tabela 12 - Teste de Tukey para os fatores com relação a variável resposta $V_{b \max}$ | 52 |
| Tabela 13 – Análise de variância ANOVA para médias da potência média de usinagem... | 55 |
| Tabela 14 - Análise de variância ANOVA para S/N da potência média de usinagem..... | 55 |
| Tabela 15 – Análise de variância ANOVA para médias da potência máxima de corte..... | 57 |
| Tabela 16 - Análise de variância ANOVA para S/N da potência máxima de corte..... | 57 |
| Tabela 17 - Análise de variância ANOVA para médias da vibração média.. | 59 |
| Tabela 18 - Análise de variância ANOVA para S/N da vibração média.. | 59 |
| Tabela 19 – Teste de Tukey para os fatores com relação a variável resposta vibração média..... | 59 |
| Tabela 20 - Análise de variância ANOVA para médias da vibração máxima..... | 61 |
| Tabela 21 – Análise de variância ANOVA para S/N da vibração máxima..... | 61 |
| Tabela 22 - Análise de variância ANOVA para médias da Emissão Média. | 63 |
| Tabela 23 – Análise de variância ANOVA para S/N da Emissão Média..... | 63 |
| Tabela 24 - Teste de Tukey para os fatores com relação a variável resposta vibração máxima..... | 64 |
| Tabela 25 - Análise de variância ANOVA para média da emissão acústica máxima..... | 66 |
| Tabela 26 - Análise de variância ANOVA para S/N da emissão acústica máxima. | 66 |
| Tabela 27 – Melhores condições para cada variável..... | 67 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|--|
| AASHTO | American Association of State Highway and Transportation Officials |
| ACI | American Concrete Institute |
| AISC | American Institute of Steel Construction |
| ASCE | American Society of Civil Engineers |
| AWS | American Welding Society |
| CSA | Canadian Standards Association |
| EER | Extensômetro Elétrico de Resistência |
| FFT | Fast Fourier Transform |
| LRFD | Load and Resistance Factor Design |
| LSD | Limit States Design |
| LVDT | Linear Variable Differential Transformer |
| NBR | Norma Brasileira Registrada |
| NRCC | National Research Council of Canada |
| PT | Ponto de Trabalho |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------|--|
| B | comprimento |
| c | calor específico |
| <i>Ec</i> | número de Eckert |
| h | espaço |
| H | espessura de material sinterizado |
| k | relação entre os coeficientes de condutividade térmica |
| p | parâmetro adimensional de pressão |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 16 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 16 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 16 |
| 2 | REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 2.1 | FERROS FUNDIDOS | 17 |
| 2.1.1 | Comparação entre os ferros fundidos | 19 |
| 2.2 | USINAGEM | 20 |
| 2.2.1 | Torneamento | 21 |
| 2.2.1.1 | Parâmetros de corte no torneamento | 23 |
| 2.2.2 | Usinagem sem fluido de corte | 24 |
| 2.2.3 | Variáveis de saída do processo | 25 |
| 2.2.3.1 | Emissão acústica | 25 |
| 2.2.3.2 | Vibração | 26 |
| 2.2.3.3 | Potência de corte | 27 |
| 2.2.3.4 | Rugosidade | 27 |
| 2.3 | MATERIAIS PARA FERRAMENTA DE CORTE | 29 |
| 2.3.1 | Ferramenta Cerâmica | 29 |
| 2.3.1.1 | Ferramenta cerâmica à base de alumina | 30 |
| 2.4 | DESGASTES | 30 |
| 2.4.1 | Mecanismos de desgaste | 32 |
| 2.5 | MÉTODO DE TAGUCHI | 33 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 36 |
| 3.1 | MATERIAL DA FERRAMENTA | 36 |
| 3.2 | MATERIAL DA PEÇA | 37 |
| 3.3 | CENTRO DE TORNEAMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS | 39 |
| 3.4 | RUGOSIDADE DA FERRAMENTA | 40 |
| 3.5 | ARMAZENAMENTO E TRATAMENTO DE DADOS | 41 |
| 3.6 | PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS | 43 |
| 3.7 | MEDIÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA | 44 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 45 |
| 4.1 | ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS VARIÁVEIS DE SAÍDA | 45 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 4.1.1 | Rugosidade R_a e R_t | 45 |
| 4.1.2 | Desgaste de flanco máximo ($V_{b \max}$) | 50 |
| 4.1.3 | Potência média de usinagem | 53 |
| 4.1.4 | Potência máxima de usinagem | 55 |
| 4.1.5 | Vibração média | 57 |
| 4.1.6 | Vibração máxima | 60 |
| 4.1.7 | Emissão acústica média | 61 |
| 4.1.8 | Emissão acústica máxima | 64 |
| 4.1.9 | Resumo dos resultados estatísticos | 66 |
| 4.2 | Desgastes na ferramenta de corte | 67 |
| 5 | CONCLUSÃO | 71 |
| | REFERÊNCIAS | 74 |

1. INTRODUÇÃO

O mundo está em constante progresso tecnológico e, a cada dia, novos materiais estão sendo desenvolvidos e aprimorados, criando demandas quanto ao processo de fabricação. Em um mercado altamente competitivo é crucial o zelo pela qualidade dos processos de fabricação, buscando a maior produtividade, reduzindo os custos e dando atenção ao fator sustentabilidade.

Dentre os diversos processos de fabricação, o com maior destaque e utilização na indústria é a usinagem, que visa adequar os materiais dentro das demandas dimensionais e geométricas específicas dos projetos através da remoção de material (Machado *et al*, 200). Por ser um processo tão importante, é necessário otimizá-lo, analisando-se como os parâmetros de corte influenciam a produtividade, qualidade superficial e vida da ferramenta. Outro fator importante, é a sustentabilidade, que torna os processos de corte à seco notórios, uma vez que a eliminação de fluidos de corte evita a poluição ambiental riscos à saúde humana (Goind ; Sarkar , 2017).

O ferro fundido nodular está crescendo em sua aplicação na indústria, principalmente na área automobilística (Guesser, 2009). Este material apresenta uma microestrutura de grafita em forma de nódulos, que promove ao material propriedades únicas como alta resistência, dureza, tenacidade, entre outros, colocando-o como um material competitivo com os aços. Por ser um material utilizável e aplicado, principalmente na fabricação de motores à combustão, é importante a realização de estudos do processo de usinagem do mesmo (Sousa *et al.*, 2018).

Um dos tipos de ferramenta de corte utilizada para a usinagem do ferro fundido nodular são as de material cerâmico. Esse tipo de material possui diversas propriedades que são excelentes para usinagem, principalmente pela possibilidade de se trabalhar em velocidade de corte maiores e não precisar utilizar o fluido de corte (França, 2020).

Entre os materiais cerâmicos, um dos que ganham grande destaque é o de base de Alumina (Al_2O_3), principalmente pelas suas excelentes propriedades como boa refratariedade, resistência mecânica, dureza elevada, alta condutividade iônica, baixa condutividade térmica, e inércia química, além da possibilidade da realização do corte à seco, trazendo o fator sustentável para o processo.(Sousa,2020 ; França, 2020) Apesar das diversas vantagens na utilização desse material, ainda assim alguns obstáculos precisam ser considerados como, por exemplo, sua baixa tenacidade, maior tendência a falhas frágeis e lascamentos. Apesar das desvantagens, a utilização desses materiais tem mostrado grande potencial de aplicação,

principalmente pela utilização de máquinas-ferramentas mais rígidas e aperfeiçoamento do processamento, como na aplicação de dopantes, fazendo que o uso e estudo desse material cresça cada vez mais. (Callisaya , 2021)

Nesse trabalho utilizou-se uma ferramenta cerâmica à base de alumina (Al_2O_3) dopada com óxido de magnésio (MgO) na usinagem de peça de ferro fundido nodular com matriz ferrítica/perlítica. Atualmente, ainda existem poucos estudos na literatura no uso dos materiais cerâmicas à base de alumina aplicada no torneamento do ferro fundido nodular, portanto esse trabalho visa contribuir de forma científica e tecnológica, oferecendo mais informações através do estudo de como os parâmetros de corte, como velocidade de corte (V_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p), influenciam nas variáveis de saída, buscando encontrar melhores combinações que levam a uma qualidade superficial da peça e garantam vida da ferramenta de corte adequada, contribuindo assim para melhor eficiência do processo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo desse trabalho é o estudo do desempenho da ferramenta cerâmica experimental a base de alumina (Al_2O_3) dopada com óxido de Magnésio (MgO), na usinagem à seco do ferro fundido nodular.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar a influência dos parâmetros de corte sobre o acabamento superficial, potência de corte, emissão acústica e vibração;
- Analisar os tipos de mecanismos de desgaste na ferramenta cerâmica.

2. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

2.1 FERROS FUNDIDOS

Os ferros fundidos têm ganhado destaque no mercado global devido à sua usinabilidade superior em relação aos aços. Eles se destacam como concorrentes fortes dos aços, ocupando a segunda posição em vendas de materiais metálicos. Esse sucesso se deve à capacidade de realizar tratamentos térmicos e adicionar elementos de liga, ampliando sua aplicabilidade, especialmente na indústria automobilística (Sousa *et al.*, 2018). Esses materiais possuem vantagens intrínsecas, como boas propriedades mecânicas, resistência à corrosão e custos de produção mais baixos em comparação com os aços. A introdução de elementos de liga e tratamentos térmicos aprimora ainda mais suas características (Guesser, 2009). Outro ponto positivo é o processo de fabricação por fundição, que permite a produção de peças complexas, ampliando sua versatilidade em várias indústrias. A usinagem desempenha um papel crucial na fabricação de ferros fundidos, sendo alvo de pesquisas para melhorar a qualidade e reduzir os custos de produção (Chiaverini, 2005).

Por definição, o ferro fundido é uma liga terciária de Fe-C-Si, apresentando mais de 2,14% de carbono em sua composição. Sua microestrutura consiste na presença de partículas de grafita em uma matriz metálica perlítica e/ou ferrítica (Chiaverini, 2005). A forma da microestrutura, composição dos elementos presentes e processamento desse material são parâmetros muito relevantes e que afetam as propriedades finais dos ferros fundidos, determinando também em que contexto será aplicado (Guesser, 2009).

A classe de materiais de ferro fundido possui famílias que são agrupadas principalmente de acordo com a forma da grafita, aparência da fratura e propriedade mecânica característica (Guesser, 2009), sendo as principais famílias:

- Ferro fundido cinzento: O ferro fundido cinzento apresenta uma fratura de coloração escura, sendo constituído principalmente por carbono e silício em sua estrutura. Grande parte do carbono está presente no estado livre, na forma de grafita lamelar, enquanto outra parte está combinada. As grafitas nesse tipo de ferro fundido são lamelas com superfícies lisas e cantos agudos, formando uma rede praticamente contínua e interconectada, sem uma orientação preferencial (De Sousa *et al.*, 2018). Essa configuração da grafita confere ao ferro fundido cinzento uma boa capacidade de condução térmica. Além disso, esse material possui boas propriedades de resistência mecânica, usinabilidade, resistência ao desgaste e capacidade de absorção de vibrações. O ferro fundido cinzento é frequentemente

utilizado em componentes que estão sujeitos à fadiga térmica, como tambores e discos de freio de motores (Upadhyay; Saxena,2020).

- Ferro fundido branco: apresenta a fratura de coloração branca, apresenta ainda como elementos fundamentais o carbono e o silício, porém devido as condições de processamento e o menor teor de silício, apresenta grande parcela da grafita em forma combinada, de cementita. Esse tipo de ferro fundido é muito duro e sua usinabilidade é consideravelmente dependente da sua microestrutura (Ngqase ; Pan, 2020).

- Ferro fundido maleável: Essa classe de ferro fundido é oriunda de um tratamento térmico com o ferro fundido branco, denominado maleabilização. Nesse tratamento grande parte da grafita combinada é transformada em nódulos, tornando assim o material mais maleável (Sousa *et al.*, 2018).

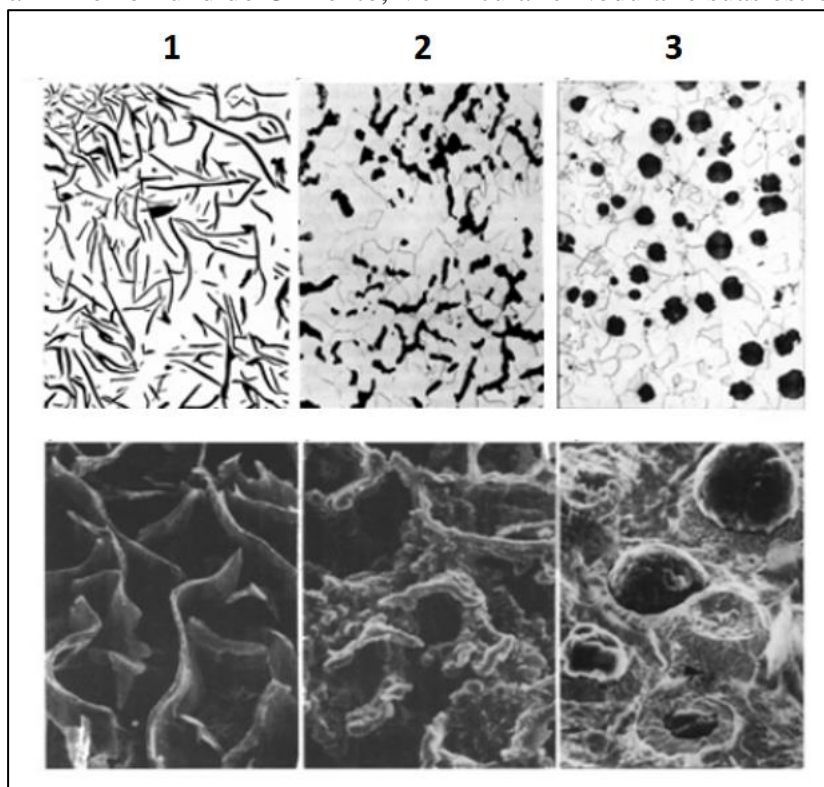
- Ferro fundido de grafita compacta ou vermicular: Apresenta a estrutura da grafita em forma de lamelas espessas com superfície áspera interconectadas, com cantos arredondados. Os cantos arredondados diminuem os pontos de concentração no material, o tornando mais tenaz e dúctil quando comparado com o ferro fundido cinzento, por exemplo. (Sousa *et al.*, 2018). Além disso, a interconectividade das lamelas proporciona ao material maior condução térmica e amortecimento de vibrações. No processamento desse material é aplicado elementos como o titânio, que diminuem a esferoidização da grafita (Guesser , 2009). O ferro fundido vermicular é considerado um material intermediário entre o ferro cinzento e o nodular, possuindo a fundibilidade próxima do ferro fundido cinzento, porém com melhor resistência mecânica e ductilidade, sendo um material de aplicação comercial recente (Ren *et al.*, 2023).

Outro aspecto fundamental a ser considerado no estudo dos ferros fundidos é que suas propriedades finais estão intrinsecamente relacionadas à composição e distribuição de seus microconstituintes. Dentre os elementos que exercem a maior influência na microestrutura, destacam-se a quantidade de carbono e silício. O carbono é o principal fator que afeta a quantidade de grafita formada, enquanto o silício promove a decomposição do carboneto de ferro. (Da ; Sidnei , 2005). Quando o manganês está presente, ele atua de forma oposta ao silício, estabilizando a cementita e neutralizando sua influência. A matriz dos ferros fundidos pode ser tanto ferrítica ou perlítica. Ferros fundidos ferríticos estão associados a maior ductilidade e dureza, enquanto os perlíticos estão associados a boa resistência mecânica e baixo ductilidade (Sousa *et al.*, 2018).

2.1.1 Comparação entre os ferros fundidos

Dentre as famílias de ferro fundido apresentados, os que possuem mais destaque industrial são ferro fundido cinzento, vermicular e nodular. Vale ressaltar que suas microestruturas impactam significativamente suas propriedades finais. Na figura 1, observar-se a diferença entre a microestrutura de cada um.

Figura 1 - Ferro Fundido Cinzento, Vermicular e Nodular e suas estruturas.



Fonte: KOPYCIŃSKI (2012)

A grafita em forma de lamelas lisas com cantos agudos no ferro fundido cinzento é a microestrutura entre os três que apresenta o maior número de pontos de concentração de tensão e planos de propagação de trinca. Esses pontos de concentração tornam o material menos resistente mecanicamente e também favorece a quebra do cavaco, melhorando a usinabilidade (Kopyciński *et al.*, 2012 ; Paciornik *et al.*, 2005). O ferro fundido nodular por sua vez, tem sua usinabilidade menor quando comparada ao cinzento e vermicular, diante a presença menos pontos de concentração, assim dificuldade na quebra do cavaco no momento de remoção do material, conferindo ao tipo de cavaco do ferro fundido nodular uma forma mais alongada semelhante ao dos aços e também diminuindo sua usinabilidade (Diniz; Marcondes ; Coppini , 2013)

2.2 USINAGEM

Como visto na seção anterior, os ferros fundidos, em geral, são materiais com grande destaque diante suas propriedades e vantagens econômicas do processo. Após o processo de fundição, entra em cenário outro processo crucial para aplicação final desses materiais, o processo de usinagem.

A usinagem é um processo de fabricação, ao qual ocorre remoção de material em forma de cavaco. O processo de usinagem é definido como a remoção de material para obtenção do mesmo dentro das especificações de forma, tamanho, dimensões e acabamento, sendo visto paradoxalmente como um processo simples e complexo ao mesmo tempo, simples pela sua alta aplicabilidade em materiais metálicos e complexo por envolver diversas variáveis que influenciam o processo como um todo (Machado *et al.*, 2015).

A popularidade do processo é muito grande, sendo o mais utilizado na indústria. Isso é evidenciado pela quantidade de cavaco da produção mundial de metais, que chega ser a 10%. Ademais, é um processo que se apresenta em diversos tipos de operações, máquinas-ferramentas e ferramentas de corte que são utilizadas, sendo aplicado em diversos setores indústrias como automobilístico, naval, aeronáutico, petrolífero, entre outros (Machado *et al.*, 2015).

A usinagem envolve uma gama diversificada de variáveis e parâmetros cujas alterações reverberam no resultado. Devido à profusão de combinações possíveis entre tais parâmetros, o processo assume uma natureza de certa forma imprevisível. No entanto, ao longo dos anos, extensas pesquisas têm sido empreendidas, o que viabiliza a análise e interpretação dos dados coletados. Mediante comparações sistemáticas, busca-se identificar as condições ótimas de usinagem, adaptadas a uma ampla diversidade de materiais. (Singh, 2022).

Na seleção de processos na usinagem, segundo Kalpakjian (1995), os seguintes fatores devem ser considerados: o tipo de material e suas propriedades, as propriedades finais desejadas, o tamanho, forma e complexidade do componente, a tolerância e acabamento superficial requeridos, o projeto subsequente, o projeto e custo ferramental, incluindo o desgaste e vida da ferramenta utilizada, a sucata gerada e seu valor, a disponibilidade de equipamento e experiências operacionais, o tempo para se iniciar a produção, o número de partes requeridas e a taxa de produção desejada, e o custo total de processamento.

O estudo do funcionamento e de como as diferentes variáveis influenciam os processos de usinagem é de extrema importância, principalmente para atender os objetivos industriais,

que incluem tornar o processo mais eficiente, garantindo boa qualidade superficial para peça, maior vida para ferramenta, e visando maior produtividade, redução de custos e sustentabilidade do processo (Souza, 2004).

O processo de usinagem pode ser categorizado por desbaste e acabamento. O desbaste tem como foco a alta taxa de remoção do material, enquanto no acabamento, tem como objetivo a qualidade superficial final da peça usinada, ou seja, trata-se de uma menor taxa de remoção e ajuste mais fino dentro das especificações (Machado *et al.*, 2015).

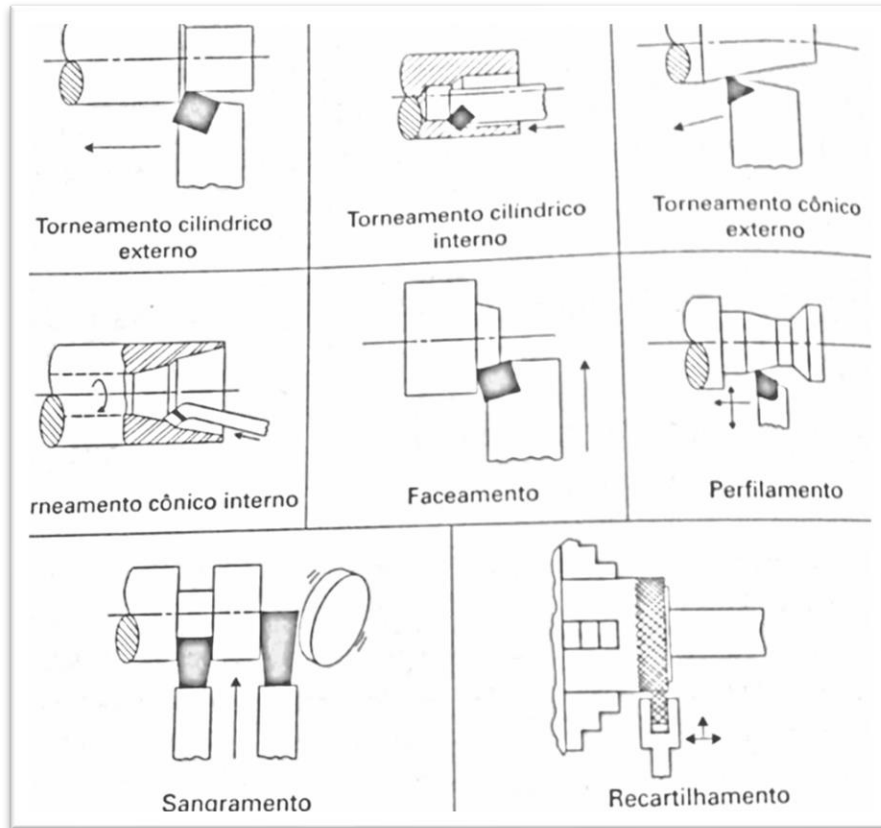
Atualmente, diversas pesquisas são feitas dentro dessa área envolvendo diferente combinações de variáveis, experiência adquirida por tentativa e erro durante anos, comparação com situações análogas e utilização de modelos matemáticos de previsão. Geralmente, essas abordagens são utilizadas em conjunto para buscar as melhores soluções e otimização para os processos de usinagem. Além disso, o surgimento de novos materiais com propriedades mecânicas cada vez superiores, também aumenta a demanda de novas pesquisas (Souza, 2004).

2.2.1 Torneamento

O torneamento tem como finalidade a obtenção de superfícies de revolução, utilizando-se de uma ferramenta monocortante, sendo um processo que possibilita a geração de uma grande variedade de peças. A peça rotaciona em torno do eixo principal da máquina, enquanto a ferramenta de corte se desloca no sentido coplanar à peça em relação ao eixo principais. O torneamento é um dos processos de usinagem mais utilizados, devido sua facilidade de operação (Diniz; Marcondes ; Coppini , 2013).

O torneamento pode ser realizado de diversas maneiras, dependendo do objetivo final e da forma da peça. Essas abordagens incluem torneamento longitudinal, faceamento, torneamento de perfis, torneamento de roscas, torneamento de geração e torneamento de forma (Diniz; Marcondes ; Coppini , 2013). Na figura 2 apresenta-se os diversos tipos de torneamento.

Figura 2 – Principais tipos de torneamento



Fonte : Machado (2015)

Nesse trabalho em específico, foi realizado o torneamento longitudinal externo, neste caso a ferramenta se desloca paralelamente ao eixo principal da peça, removendo cavaco da superfície exterior, como demonstrado na figura 3.

Figura 3 – Torneamento longitudinal externo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

2.2.1.1 Parâmetros de corte no torneamento

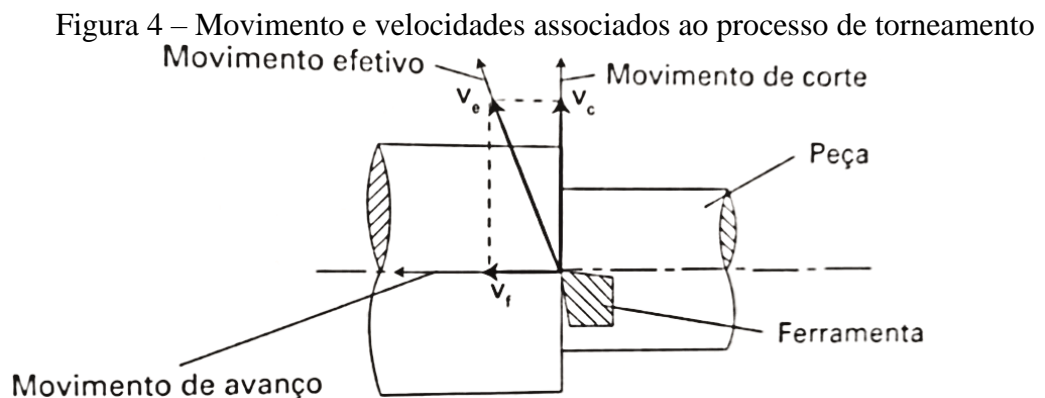
O controle dos parâmetros de corte é crucial para o processo, pois determinará a produtividade, qualidade das peças e também a vida da ferramenta utilizada. Os parâmetros de entrada são velocidade de corte (V_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p). Mudanças nesses fatores influenciam diretamente o processo, por isso é de grande importância um bom planejamento (Laouiss *et al.*, 2018). Alterações efetuadas nessas variáveis influenciam diretamente tanto o procedimento em si quanto os parâmetros de saída, reforçando assim a relevância significativa de um bom planejamento e escolha das variáveis, levando em consideração os dados presentes na literatura e nas pesquisas científicas (Soori ; Asmael ; 2022).

Velocidade de corte (V_c): para o processo de torneamento, onde os movimentos de corte e avanço ocorrem concomitantemente, a velocidade de corte é definida como a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça.

Avanço (f) : é o percurso de avanço em cada volta ou em cada curso da ferramenta. Através dele é calculado a velocidade de avanço, que é o produto do avanço, pela rotação da ferramenta.

Profundidade de usinagem (a_p) – para o torneamento é considerado profundidade de usinagem, sendo a profundidade de penetração da ferramenta em relação à peça.

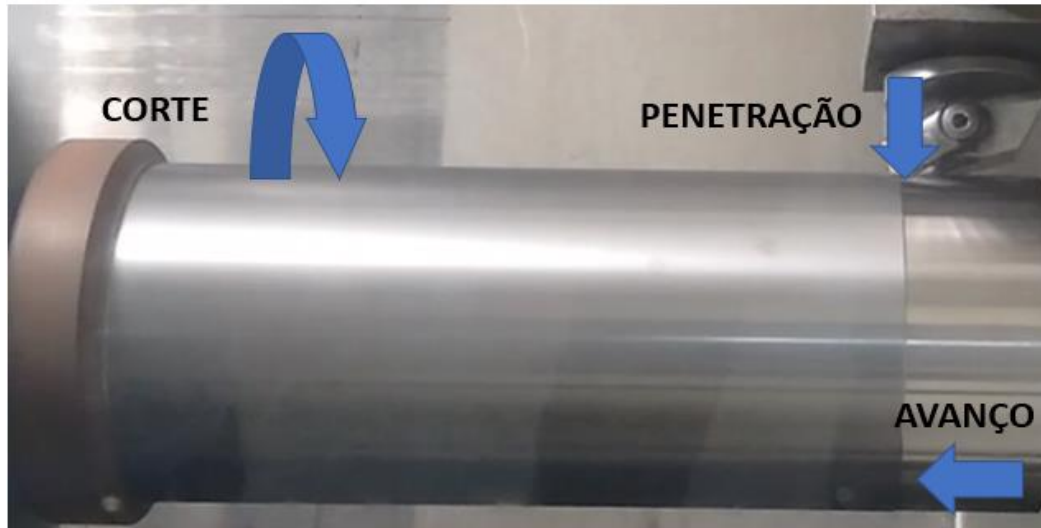
Na figura 4 é possível verificar as principais velocidades e movimentos associados ao torneamento.



Fonte: Machado (2015)

Na figura 5 é possível verificar os parâmetros de corte associados ao processo de torneamento.

Figura 5 – Parâmetros de corte associados ao processo de torneamento



Fonte : Elaborado pelo próprio autor (2024)

Diversas pesquisas são realizadas analisando como os fatores de entrada, no caso a velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte, influenciam nas principais variáveis de saída, como desgaste de flanco (V_b), rugosidade (R_a e R_t), emissão acústica, vibração e potência de corte. Esses valores de saída são de extrema importância para avaliar a qualidade superficial da peça, a vida útil da ferramenta e, principalmente, para otimizar o processo como um todo (Pimenov,2022). Portanto, o conhecimento destas grandezas físicas e a combinação desses parâmetros juntamente com a análise de outros fatores que envolvem o processo, pode favorecer a produção, tornando-o um processo mais lucrativo, com menos tempo de fabricação e maior qualidade das peças finais (Agarwal, 2016).

2.2.2 Usinagem sem fluido de corte

Na indústria de usinagem, há uma crescente tendência de realizar procedimentos sem a dependência de fluidos de corte, motivada principalmente por preocupações ambientais, custos e saúde dos operadores. O uso de fluidos de corte apresenta desafios, incluindo poluição ambiental, riscos à saúde dos operadores e custos elevados. Isso levou a estudos

para minimizar o uso desses fluidos, como o desenvolvimento de ferramentas com baixo coeficiente de atrito e alta dureza (Pimenov, 2022). No entanto, é importante notar que os fluidos de corte ainda desempenham um papel vital em certos tipos de processos. Eles prolongam a vida útil das ferramentas, minimizam o desgaste, reduzem a formação de arestas postiças e melhoram a qualidade superficial das peças usinadas, devido a sua atuação como refrigerante e lubrificante, atenuando o calor gerado devido ao atrito da peça e ferramenta no processo de usinagem. Em alguns casos, a escolha de não utilizar fluidos de corte pode prejudicar tanto a peça quanto a ferramenta (Muñoz ; Diniz, 2013).

A usinagem de ferros fundidos pode alcançar resultados satisfatórios sem a necessidade de fluidos de corte, em processos à seco. Além disso, existem materiais de ferramentas de corte mais adequados para processos que não envolvem o uso de fluidos de corte (Goindi; Sarkar, 2016), como é o caso das ferramentas a base de alumina. As ferramentas cerâmicas à base de óxido de alumínio são conhecidas por sua alta dureza à quente e estabilidade química. A aplicação de fluidos de corte com essa classe de material é desaconselhada devido à fragilidade e baixa resistência ao choque térmico desses materiais (Diniz; Marcondes ; Coppini , 2013).

2.2.3 Variáveis de saída do processo

As variáveis de saída nos processos de torneamento desempenham um papel crucial na avaliação da qualidade do processo em suas diversas partes. Dentre as variáveis de saída que podem ser usadas para monitoramento do processo estão emissão acústica, vibrações, potência de usinagem. Como variáveis relacionadas à qualidade, pode-se citar a rugosidade como elemento.

2.2.3.1 Emissão acústica

A emissão acústica é a geração de ondas elásticas transitórias de alta amplitude e baixa frequência, resultantes da rápida liberação de energia de várias fontes, conforme definido pela ASTM E610-77. No processo de usinagem, o atrito entre a ferramenta e a peça causa deformações que liberam energia, gerando ondas de tensão que se propagam da superfície em direção ao centro do material (Li, 2002).

Essas liberações de energia podem ser detectadas por um sensor piezoelétrico, que converte o deslocamento em sinais elétricos. A energia no sinal de emissão acústica e a taxa

de dissipação dela dependem fortemente da taxa de deformação, do estresse aplicado e do volume de material removido. Esses sinais podem ser picos ou contínuos e são úteis para detectar quebras e trincas (Twardowski,2021). A emissão acústica é calculada como a média aritmética dos quadrados dos valores puros de emissão acústica, seguindo a equação:

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{1/\Delta t \int \Delta t EA(t) dt} \quad (1)$$

Nesta fórmula, E_{RMS} representa o valor quadrático médio da emissão acústica, Δt é o intervalo de tempo de integração e EA é o sinal puro da Emissão Acústica (Euzebio, 2012).

A emissão acústica desempenha um papel fundamental no monitoramento e controle da usinagem, uma vez que os limites de frequência desse fenômeno oferecem informações cruciais sobre o processo em andamento. A medição e análise da emissão acústica são essenciais para identificar problemas, otimizar a usinagem e garantir a qualidade das peças usinadas.

2.2.3.2 Vibração

A análise de vibrações desempenha um papel crítico na avaliação do desempenho da usinagem, pois o aumento dessas vibrações pode prejudicar a qualidade da superfície usinada e danificar as ferramentas de corte (Siddhpura ; Paurobally, 2012). A intensidade das vibrações tende a crescer com o aumento da velocidade e da profundidade de corte, variando conforme o material da peça, a ferramenta e as condições de usinagem. Além disso, o aumento do raio da ponta da ferramenta pode contribuir para o aumento das vibrações devido ao maior contato com a peça (Pinheiro, 2018).

Vibrações durante a usinagem podem originar-se de várias fontes, incluindo problemas na máquina, peça de trabalho, montagem inadequada da ferramenta e desgaste gradual da própria ferramenta de corte ao longo do processo. A medição das vibrações é geralmente feita com acelerômetros piezoelétricos, e a análise do sinal é fundamental para avaliar o desgaste da ferramenta e otimizar o processo de usinagem (Machado *et al.*, 2015).

As vibrações resultam da dinâmica do processo de corte em ressonância com as estruturas circundantes, como porta-ferramentas, peça e máquina. A falta de amortecimento adequado pode prejudicar a qualidade do processo, causando irregularidades na superfície, imprecisões e aumento de desgaste na ferramenta. Essas vibrações são conhecidas como

vibrações auto-excitadas e são causadas pelo movimento da ferramenta sobre a peça, gerando atrito e vibração (Stemmer, 1995).

Tendências na usinagem incluem a diminuição das vibrações com o aumento de dureza e tenacidade do material, enquanto o aumento da velocidade e profundidade de corte tende a aumentar as vibrações. O avanço normalmente tem um efeito menor sobre as vibrações. No entanto, é importante notar que essas tendências podem variar devido a vários fatores envolvidos no processo de usinagem (Souza, 2004).

2.2.3.3 Potência de corte

A potência desempenha um papel crucial na avaliação da qualidade do processo de usinagem, estando intrinsecamente ligada às forças presentes nesse processo. Compreender e controlar esse parâmetro é fundamental para garantir a rigidez e a ausência de vibrações em elementos como fixações e porta-ferramentas durante a usinagem (Trent; Wright, 2000).

As forças durante a usinagem podem ser decompostas em três componentes principais (Pinheiro, 2018).

- Força de corte (F_c): esta força atua diretamente no processo de remoção de material.
- Força de profundidade ou passiva (F_p): atua perpendicularmente ao plano de trabalho, não contribuindo para a potência de corte, mas influenciando na estabilidade do processo.
- Força de avanço (F_f): esta força é projetada na direção do avanço da ferramenta de corte, impactando diretamente na velocidade de avanço.

A potência de corte (P_c) pode ser calculada usando a equação 2.

$$P_c = F_c \cdot V_c \quad (2)$$

Onde P_c é a potência de corte em watts (W), F_c é a força de corte em newton (N) e V_c é a velocidade de corte em m/min.

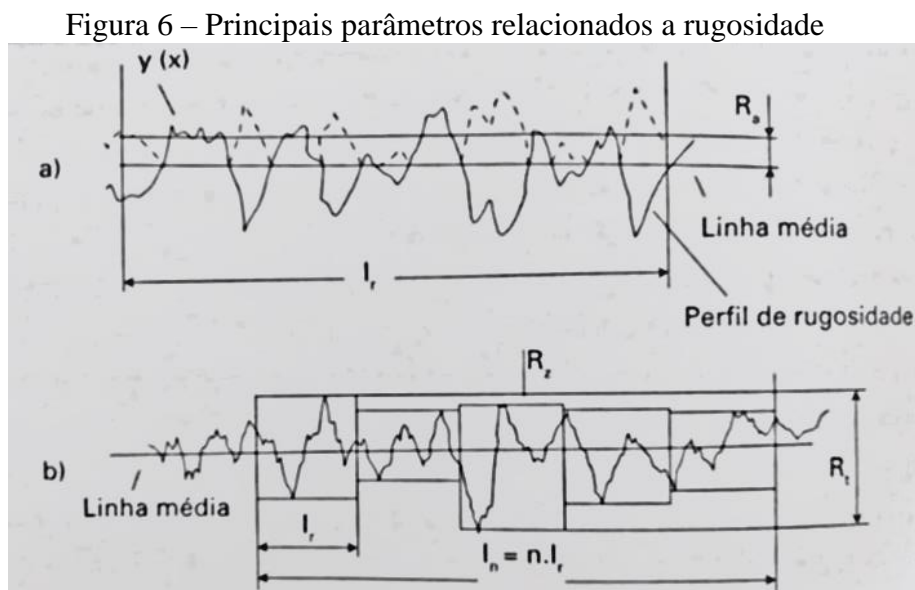
A medição precisa das forças é essencial para otimizar as configurações geométricas das ferramentas e influencia significativamente na eficiência e qualidade das operações de usinagem (Machado *et al.*, 2015).

2.2.3.4 Rugosidade

Um dos fatores cruciais para um bom desempenho e qualidade do processo de usinagem é o acabamento superficial. A qualidade superficial está diretamente ligada à presença de ondulações, falhas e rugosidade da peça trabalhada. A rugosidade pode ser definida como irregularidades que ocorrem durante a remoção do material causadas, por exemplo, pelo desgaste da ferramenta e marcas de avanço (Machado *et al.*, 2015).

A avaliação da rugosidade é comumente feita através dos parâmetros R_a e R_t . O R_a é o desvio médio entre picos e vales em uma medição, enquanto o R_t representa a diferença total de altura entre o pico mais alto e o vale mais baixo dentro de uma distância de avaliação. O parâmetro R_t é preferível para identificar problemas na fabricação sendo mais sensível à presença de defeitos na superfície da peça (Machado *et al.*, 2009). O comprimento de amostragem (*cut-off*) é um parâmetro padrão que filtra o perfil da rugosidade e destaca rugosidades, ondulações ou desvios de ordem superior, seus valores dependem da faixa de R_a analisada, conforme a norma ISO 4288:2008.

Na figura 6 apresenta-se os principais parâmetros relacionados a rugosidade.



Fonte : Machado (2015).

Vários fatores contribuem para a formação da rugosidade, incluindo a estrutura da máquina, geometria da ferramenta de corte, material da ferramenta, peça usinada, montagem da ferramenta, profundidade de corte, velocidade de corte e avanço (Şahinoğlu; Rafighi, 2019).

O acabamento superficial é crucial para a qualidade do processo de usinagem, pois afeta diretamente a presença de ondulações, falhas e rugosidade na peça. A rugosidade é medida por rugosímetros (Ramesh *et al.*, 2020).

2.3 MATERIAIS PARA FERRAMENTA DE CORTE

Na usinagem, a seleção cuidadosa do material da ferramenta de corte é essencial para o processo. Uma premissa importante no contexto de escolha da ferramenta de corte é que seu material precisa ter uma resistência e dureza superior ao material da peça usinada para que o processo de remoção de material possa ocorrer efetivamente (Machado *et al.*, 2015).

O desenvolvimento de novos materiais e aprimoramento de materiais já existentes tem crescido de forma exponencial, surgindo assim materiais com dureza e resistência cada vez mais elevadas. Dessa forma, surge a necessidade de desenvolvimento e aprimoramento das ferramentas de corte para atender essas novas demandas (Bobzin, 2017).

As características desejadas no material da ferramenta incluem dureza, tenacidade, resistência ao desgaste, resistência à compressão, resistência ao cisalhamento, boas propriedades mecânicas e térmicas, resistência ao choque térmico e inércia química. A importância dessas características varia dependendo de fatores como o material a ser usinado, o processo de usinagem, a máquina operatriz, a forma e dimensões da ferramenta, o custo do material da ferramenta, as condições de usinagem e de operação (Diniz; Marcondes ; Coppini,2013). Um desafio na indústria de usinagem é conciliar a dureza e a tenacidade do material da ferramenta (Souza *et al.*, 2009).

Em suma, o material da ferramenta de corte deve ter maior dureza que o material a ser usinado, e diversos fatores influenciam a escolha da ferramenta, sendo importante equilibrar a dureza e a tenacidade (Machado *et al.*,2015). Diversos materiais estão disponíveis, cada um com suas características específicas, e a seleção deve considerar as necessidades de cada processo de usinagem. Os materiais comuns para ferramentas de corte incluem aço rápido, metal duro, cermet, cerâmica, CBN e diamante (Diniz; Marcondes ; Coppini,2013).

2.3.1 Ferramenta Cerâmica

As ferramentas cerâmicas têm ganhado destaque na indústria devido às suas propriedades únicas, como resistência a altas temperaturas, alta resistência à abrasão, dureza elevada e inércia química (Sousa, 2013). Essas características conferem eficiência aos processos de usinagem, tornando-as concorrentes de metais duros, aços rápidos e cermets como ferramentas de corte em diversos contextos, especialmente em condições de alta velocidade de corte (Machado *et al.*, 2015; Callister, 2006).

Os materiais cerâmicos, compostos por elementos metálicos e não metálicos, podem ser óxidos, carbonetos e nitretos, com diferentes estruturas cristalinas. A adição de outros óxidos, como SiO_2 , Fe_3O_4 , Cr_2O_3 e MgO influencia as propriedades mecânicas desses materiais (Machado *et al.*, 2015).

As ferramentas cerâmicas, especialmente as de alumina, destacam-se por sua resistência a altas temperaturas durante o processo de usinagem, permitindo operações em velocidades elevadas, resultando em maior produtividade. Sua inércia química inerente contribui para um menor desgaste da ferramenta. No entanto, sua baixa tenacidade pode levar à propagação de trincas em certas circunstâncias (Callister, 2006).

Entre as desvantagens das ferramentas cerâmicas tem-se alta fragilidade, baixa tenacidade, condutividade térmica reduzida e baixa resistência ao choque térmico (Sousa, 2013). Estas limitações estão sendo aprimoradas por meio de avanços na fabricação de máquinas-ferramentas mais rígidas e melhorias nos materiais cerâmicos, incluindo controle de processo e utilização de dopantes (Trent e Wright, 2000).

2.3.1.1 Ferramenta cerâmica à base de alumina

As ferramentas de corte à base de alumina têm ganhado destaque na indústria devido a suas excelentes propriedades, como boa refratariedade, alta resistência mecânica, dureza, alta condutividade iônica, baixa condutividade térmica, estabilidade química e resistência ao choque térmico (Sousa, 2013). Elas são utilizadas principalmente no desbaste e acabamento de ferros fundidos (Stemmer, 1995).

A alumina pura é frágil em certas condições de usinagem, mas a adição controlada de dopantes, como o óxido de magnésio (MgO) melhora sua tenacidade (Duarte, 2022).

O MgO atua na sinterização da alumina, resultando em maior uniformidade na estrutura e densificação, o que aumenta a resistência mecânica, tornando-o mais aplicável em processos de usinagem (Barsoum; 2003 ; Alves; 2018). Além disso, essas ferramentas podem ser usadas em processos de usinagem sem fluidos de corte, o que torna o procedimento mais seguro, menos poluente e mais econômico (Callisaya; 2021).

2.4 DESGASTES

O desgaste da ferramenta no processo de usinagem resulta na perda progressiva de material, podendo ocorrer de forma isolada ou sobreposta devido a várias solicitações, como mecânicas, térmicas e químicas (NBR ISO 3685, 2017).

Existem dois tipos principais de desgaste: avarias e desgaste contínuo. As avarias são ocorrências abruptas durante o processo de usinagem, incluindo lascamentos, trincas e quebras da aresta de corte. Já o desgaste contínuo é uma perda microscópica de partículas da ferramenta de corte devido à interação com a peça usinada e se manifesta de três formas, desgaste de flanco, desgaste de cratera e desgaste de entalhe (Diniz; Marcondes ; Coppini,2013).

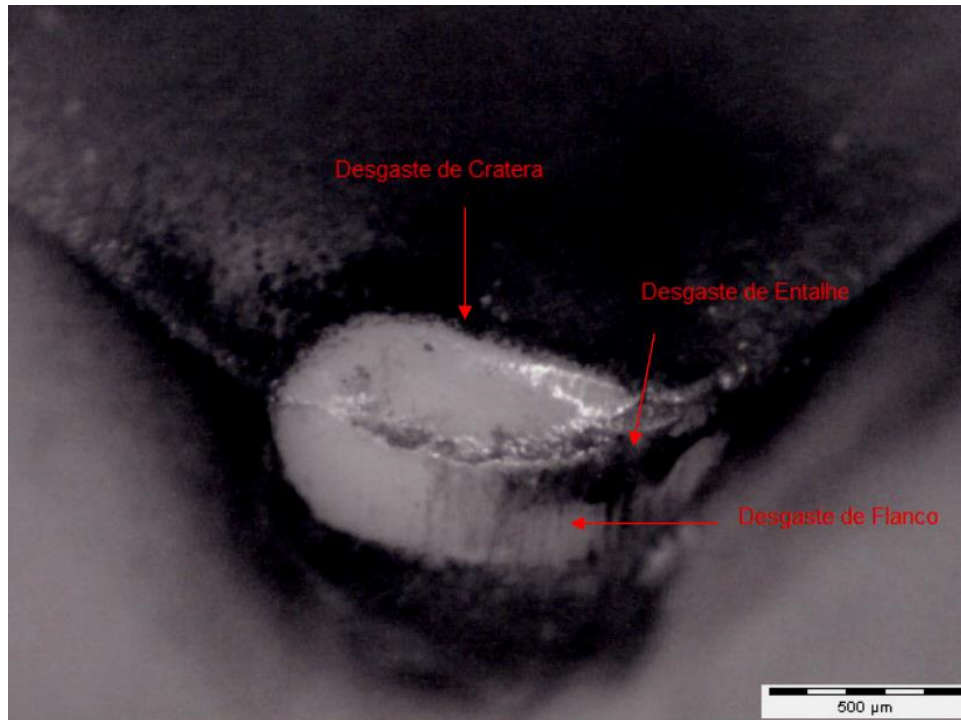
O desgaste de flanco ocorre devido ao atrito entre a peça e a ferramenta durante o corte, afetando as arestas principal e secundária de corte (Machado *et al.*, 2015). Esse tipo de desgaste pode comprometer a qualidade da peça usinada, especialmente se atingir a aresta principal, aumentando a temperatura e as forças de corte, causando vibração e impactando o controle dimensional e o acabamento superficial (Diniz; Marcondes ; Coppini,2013).

O desgaste de cratera é causado pela interação do cavaco removido da peça com a superfície da ferramenta, ocorrendo principalmente em altas temperaturas e resultando em uma cratera alongada com extremidades arredondadas (Machado *et al.*,2015).

O desgaste de entalhe ocorre nas extremidades de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, podendo ser causado por fatores como material endurecido de passes anteriores da ferramenta ou oxidação devido à exposição ao ar ou fluido de corte (Diniz; Marcondes ; Coppini,2013)

Na figura 7 é apresentado os diferentes tipos de desgastes.

Figura 7 – Desgaste de cratera, de flanco e entalha em uma ferramenta cerâmica



Fonte: França (2022)

2.4.1 Mecanismos de desgaste

Os mecanismos de desgaste são os fenômenos que dão origem ao desgaste das ferramentas, que envolvem as propriedades físico-químicas do material da ferramenta e da peça, combinado com as condições de corte. O estudo dos mesmos é crucial para determinação da vida da ferramenta, além da busca de ações para minimizá-los. Os principais mecanismos de desgastes que ocorrem no torneamento de ferros fundidos são abrasão, adesão e difusão (Binder ; Klocke,; Lung , 2015).

- **Abrasão Mecânica:** esse é o mecanismo principal de desgaste da ferramenta, presente tanto no desgaste de flanco, quanto no de cratera, porém ocorrendo de forma mais intensa no desgaste de flanco. Basicamente, esse desgaste ocorre devido ao atrito entre a peça e a ferramenta, no caso de flanco, e entre ferramenta e cavaco, no caso de cratera. Esse desgaste é acentuado pela presença de partículas duras do material da peça e também pela temperatura de corte (Diniz; Marcondes ; Coppini,2013).

- **Desgaste por adesão:** ocorre quando duas superfícies metálicas estão em contato em situação de baixa velocidade de corte, baixas temperaturas e sob cargas moderadas, que leva a formação de um extrato metálica, que provoca aderência. Essa aderência pode ser tão alta que quando ocorre tentativa de separação, ocasiona ruptura nos metais envolvidos, levando partículas de um metal para o outro (Pálmai, 2013). Geralmente,

para minimizar esse fenômeno, é utilizado fluidos de corte com efeito lubrificante ou recobrimento da ferramenta com materiais com baixo coeficiente de atrito (Diniz; Marcondes ; Coppini,2013).

- Difusão: esse mecanismo é ativado principalmente em temperatura altas, relacionadas a velocidades de corte e avanços altos, sendo um dos principais mecanismos que conduzem ao desgaste de cratera (Stemmer,1995). Ocorrem principalmente no contato da ferramenta com a peça, onde átomos de um material são transferidos para o outro e vice e versa, devido a uma interação química entre os materiais. Uma das soluções atuais para evitar esse desgaste é a utilização de coberturas de materiais que são inertes quimicamente, ou a utilização de um material de ferramenta que possua essas características, como os materiais de base de óxido de alumina (Diniz; Marcondes ; Coppini, 2013 ; Stemmer, 1995).

Na usinagem com ferramentas de corte cerâmicas à base de alumina, observa-se que o mecanismo de desgaste predominante é o abrasivo (Sousa, 2013). Isso ocorre devido à notável inércia química desse material, que reduz a incidência de mecanismos de desgaste difusivo, além disso, essas ferramentas são comumente empregadas em operações de usinagem de alta velocidade, o que minimiza a ocorrência do desgaste por aderência (Sousa, 2013). Esse cenário proporciona benefícios significativos tanto para a vida útil da ferramenta quanto para a qualidade geral do processo de usinagem.

2.5 MÉTODO DE TAGUCHI

O método de Taguchi é uma abordagem fundamental no planejamento de experimentos, frequentemente aplicada na engenharia de qualidade, com o principal objetivo de aprimorar a robustez e o desempenho dos processos (Roy *et al*, 2001; Kondo, 2019). Seu propósito fundamental consiste na investigação e otimização dos parâmetros envolvidos em um processo, bem como de suas combinações, com o intuito de promover melhorias na qualidade de um produto ou processo (Roy *et al* , 2021).

Embora a utilização de experimentos fatoriais completos seja uma prática comum no planejamento de experimentos, essa abordagem pode demandar um número substancial de experimentos, tornando-se inviável devido às limitações de recursos e custos, entre outros fatores (Kondo ,2019). Nesse contexto, o método de Taguchi se destaca como uma ferramenta altamente eficaz para identificar parâmetros estatisticamente relevantes em um processo, utilizando um conjunto reduzido de experimentos. Isso possibilita a obtenção de

dados e análises essenciais para melhorar a robustez do processo de maneira mais eficaz e econômica (Silva, 2013).

Quando se trata do método de Taguchi, três conceitos fundamentais desempenham um papel crucial: a maximização do sinal-ruído, a minimização da função de perda de qualidade e o uso de arranjos ortogonais (Roy *et al*, 2001). Essa ferramenta combina arranjos ortogonais com fatoriais fracionados, eliminando a necessidade de realizar todas as combinações possíveis dos parâmetros envolvidos. Essa abordagem se mostra eficaz ao estimar como os parâmetros afetam as respostas do processo, identificando as melhores combinações que resultam em um processo mais robusto, ou seja, com menor variabilidade (Silva, 2013).

É relevante enfatizar que o uso de arranjos ortogonais reduz consideravelmente o número de experimentos necessários, tornando o processo de otimização mais eficiente e econômico. Além disso, ao focar na maximização do sinal-ruído, resultando em um produto ou processo de menor variabilidade de qualidade (Silva, 2013). Juntamente com a minimização da função de perda de qualidade, busca dos parâmetros que garantam a robustez do processo, ou seja, a redução da variabilidade do processo em face de mudanças indesejáveis no ambiente atribuídas a fatores incontrolláveis ou ruídos do processo, o método de Taguchi emerge como uma ferramenta poderosa para melhorar a qualidade e robustez dos processos industriais, motivo pelo qual sua aplicação tem crescido em diversas áreas da indústria (Kondo, 2019).

Para minimizar a variabilidade, é crucial selecionar os níveis dos fatores que resultam nos maiores valores da razão sinal-ruído (S/N). Segundo Roy *et al* (2001) em relação às características de qualidade, existem três cenários principais:

- Menor é a melhor característica: no método de Taguchi, quando se diz que "menor é melhor", lida-se com um tipo de característica de qualidade em que a meta é minimizar a variabilidade do processo, buscando valores mais baixos dessa característica.

A medida de desempenho associada a esse cenário é a "razão sinal-ruído" (S/N). A equação utilizada para calcular a razão sinal-ruído quando "menor é melhor" é a seguinte:

$$S/N = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sum_{i=1}^n Y_i^2}{n} \right) \quad (3)$$

Onde n é o número de repetições do experimento Y_i , Y_i é o valor de resposta na condição experimental e i é inteiro positivo.

• Nominal é a melhor característica: No Método de Taguchi, quando se diz que "nominal é melhor", estamos lidando com um tipo de característica de qualidade em que a meta é atingir um valor alvo específico e não zero como ideal. Isso significa que estamos buscando a conformidade com um valor de referência pré-determinado. A medida de desempenho associada a esse cenário é a "razão sinal-ruído" (S/N), calculada de acordo com a fórmula apropriada para esse tipo de característica. A fórmula para calcular a razão sinal-ruído quando "nominal é melhor" se encontra na equação 4.

$$S/N = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{n} \right) \left(\frac{1}{Y_i^2} \right) \right) \quad (4)$$

• Maior é a melhor característica: No Método de Taguchi, quando se diz que "maior é melhor", estamos lidando com um tipo de característica de qualidade em que o objetivo é maximizar o valor da característica. Isso significa que estamos buscando aumentar a qualidade do produto ou processo, em que valores mais altos da característica são considerados melhores. A fórmula para calcular a razão sinal-ruído quando "maior é melhor" encontra-se na equação 5.

$$S/N = 10 \cdot \log \left(\frac{\hat{Y}^2}{S^2} \right) \quad (5)$$

Onde \hat{Y} é dado pela equação 6 e S dado pela equação 7.

$$\hat{Y} = \frac{\hat{Y}_i}{n} \quad (6)$$

$$S = \frac{1}{n-1} \sum (Y - \bar{Y})^2 \quad (7)$$

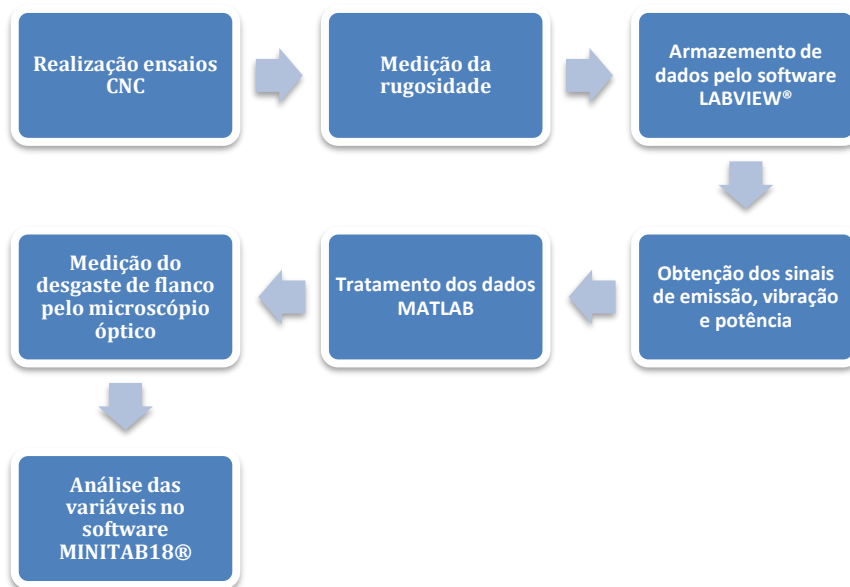
Em todos esses cenários, a taxa de sinal-ruído é calculada de acordo com equações específicas, adequando-se ao tipo de característica de qualidade em questão.

Em suma, o método de Taguchi é uma abordagem poderosa e flexível para otimizar a qualidade e a robustez dos processos industriais, adaptando-se a diferentes tipos de características de qualidade e fornecendo uma estrutura sólida para a tomada de decisões baseadas em dados, sendo uma ferramenta muito útil para avaliar e aplicar as melhores parâmetros dentro de um processo de usinagem (Roy *et al* , 2021).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta parte está dividida em subseções, abordando o objeto em que o torneamento foi aplicado (seja a peça ou o corpo de prova), a máquina de torneamento utilizada para executar o processo, os sensores responsáveis pela coleta dos sinais, o processo de processamento dos dados e os softwares empregados, o tipo de material utilizado na ferramenta de corte e os instrumentos utilizados para medir a rugosidade da peça e o desgaste da ferramenta. Na figura 8 pode ser observado o fluxograma das principais etapas do trabalho.

Figura 8 – Fluxograma das principais etapas do processo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

3.1 MATERIAL DA FERRAMENTA

As ferramentas de cerâmica $Al_2O_3 + MgO$, foram desenvolvidas pelo Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá - UNESP, com 99,50% de Al_2O_3 e 0,50% de MgO (em peso) e densidade relativa igual 98,6%. A ferramenta tem geometria final tem código SNMN120408, com chanfro de 20°.

Na tabela 1 podem ser vistas as principais propriedades da ferramenta utilizada nesse trabalho.

Na figura 9 pode ser visto a ferramenta de corte utilizada nesse trabalho.

Tabela 1 – Principais propriedades da ferramenta de corte de alumina dopada com óxido de magnésio.

| Propriedade | Valor |
|--|----------------------------|
| Dureza Vickers | Hv = 20.80 GPa \pm 0,11% |
| Tenacidade à fratura (MPa·m ^{1/2}) | KIC = 3,045 \pm 0,16% |
| Densidade relativa | 98,60% |
| Retração Linear | 20,4 \pm 0,16% |
| Módulo de Young G (Gpa) | 392,14 \pm 0,10% |
| Módulo de Cisalhamento G(GPa) | 169,73 \pm 0,08% |

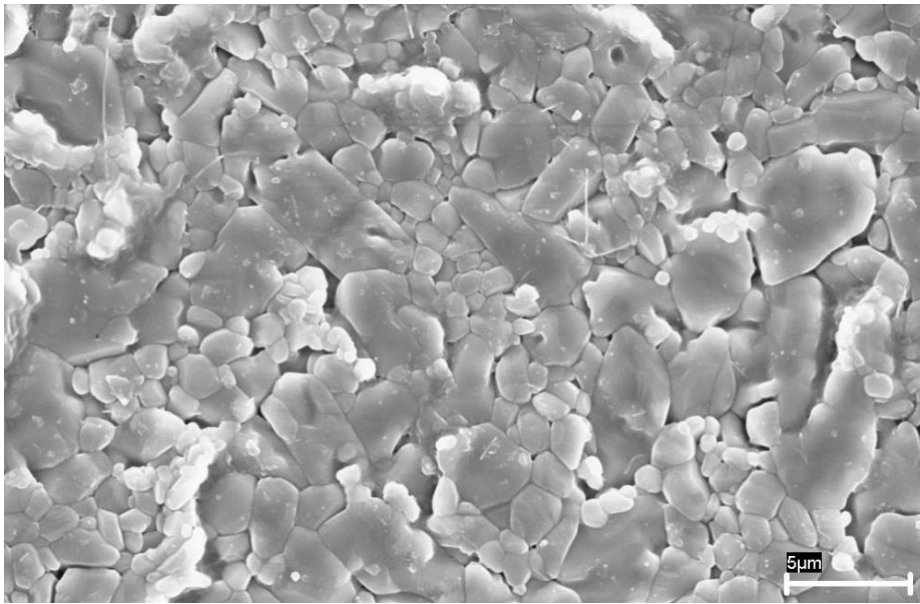
Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Figura 9 – Ferramenta cerâmica de Al₂O₃+MgO.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Na figura 10 observa-se a microestrutura da ferramenta utilizada nesse trabalho.

Figura 10 – Micrografia da ferramenta cerâmica de Al_2O_3 (99,5%) dopada com MgO (0,5%)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

3.2 MATERIAL DA PEÇA

O material da peça utilizado foi um lingote cilíndrico de ferro fundido nodular de matriz ferrítica/perlítica com comprimento total inicial de 272 mm e diâmetro de 97 mm, sendo a composição química nominal de 3.15 ± 0.1 C, 2.5 ± 0.1 Si, 0.4% Mn, 0.5 ± 0.05 P, 0.6 ± 0.05 S, 0.05 ± 0.01 Cr, 0.1 ± 0.05 Cu, de acordo com ABNT NBR 6916. O material da peça utilizado nesse trabalho pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Tarugo do ferro fundido nodular utilizado nos ensaios de torneamento



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

3.3 CENTRO DE TORNEAMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS

Os testes de usinagem serão realizados no laboratório de usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG-UNESP, utilizando o centro de torneamento CNC marca Romi, modelo GL240M, com potência de 15 kW. O procedimento foi realizado sem a presença de fluido de corte, num torneamento longitudinal externo à seco.

A coleta de informações relacionadas aos sinais de emissão acústica, potência de corte e vibração foi efetuada por meio de um sistema de aquisição de dados da marca National Instruments, modelo BNC-2120, empregado para o registro e armazenamento dos dados.

Foi utilizado um sensor para registrar os dados de potência consumida durante o processo, um transdutor de corrente da marca Lem, modelo AT 100 B10. Esse sensor foi conectado a uma das fases de entrada que alimentam o centro de torneamento. Ele transmite um sinal de tensão que é proporcional à corrente elétrica na entrada do motor para o módulo de canais, permitindo assim a medição indireta da potência consumida durante a usinagem, sendo utilizado uma taxa de captação dos sinais de 4kHz.

A vibração foi avaliada por meio de um sensor piezométrico da marca Vibro Control, que apresenta o modelo TV-100 e possui uma capacidade de detecção de até 25 mm/s em sinal RMS.

Para aquisição da emissão acústica, foi empregado um sensor R15 α fabricado pela *Physical Acoustic Corporation*, em conjunto com o pré-amplificador de modelo 1272. Esses componentes forneceram uma saída em RMS que é direcionada ao módulo de canais.

Na figura 12 encontra-se o centro de torneamento utilizado para os ensaios de usinagem.

Figura 12 – Centro de Torneamento CNC marco Romi Modelo GL240M



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Na tabela 2, são apresentadas as variáveis analisadas e os equipamentos utilizados para obter os dados associados as mesmas.

Tabela 2 – Variáveis medidas e equipamentos associados

| Variável | Equipamento utilizado |
|--------------------|--|
| Potência | Sensor de efeito Hall LEM Modelo AT 100 |
| Vibração | Sensor Piezelétrico VIBRO CONTROL modelo TV-100 |
| Emissão Acústica | Sensor com pré-amplificador Modelo 1272 e sensor R15 α da Physical Acoustic Corporation |
| Rugosidade Ra e Rt | Rugosímetro portátil da MAHR modelo MarSurf M300 + RD18 |
| Desgaste de Flanco | Mitutoyo Quick Scope QS-LZB serie. 359 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

3.4 RUGOSIDADE DA FERRAMENTA

A qualidade da usinagem foi avaliada por meio da medição da rugosidade, utilizando um rugosímetro portátil modelo MarSurf M300 e MarSurf RD18. A calibração do equipamento foi realizada antes dos ensaios. O *cut-off* utilizado foi de 0,8 mm, de acordo com a NBR ISO 4288:2008, para as medidas de rugosidade R_a e R_t , medido após a terceira passada da ferramenta em cada parte do corpo de prova. Utilizou-se o rugosímetro pode ser encontrado na figura 13.

Figura 13 – Rugosímetro portátil Marsurf M300



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

3.5 ARMAZENAMENTO E TRATAMENTO DE DADOS

Os dados foram adquiridos e registrados durante os experimentos com a ajuda do programa LABVIEW® e subsequentemente processados e analisados por meio do software MATLAB® R2022b.

Para converter os sinais de tensão U_{cc} emitidos pelos sensores nas variáveis desejadas, potência em Watts (W), emissão acústica em V_{RMS} e vibração em mm/s, foram utilizadas as equações 8, 9 e 10, respectivamente.

$$P_U = U_{cc} \cdot 10.220.0,79 \cdot \sqrt{3} \quad (8)$$

$$EA_{RMS} = U_{cc} \quad (9)$$

$$Vib = \frac{U_{cc} \cdot 25}{8} \quad (10)$$

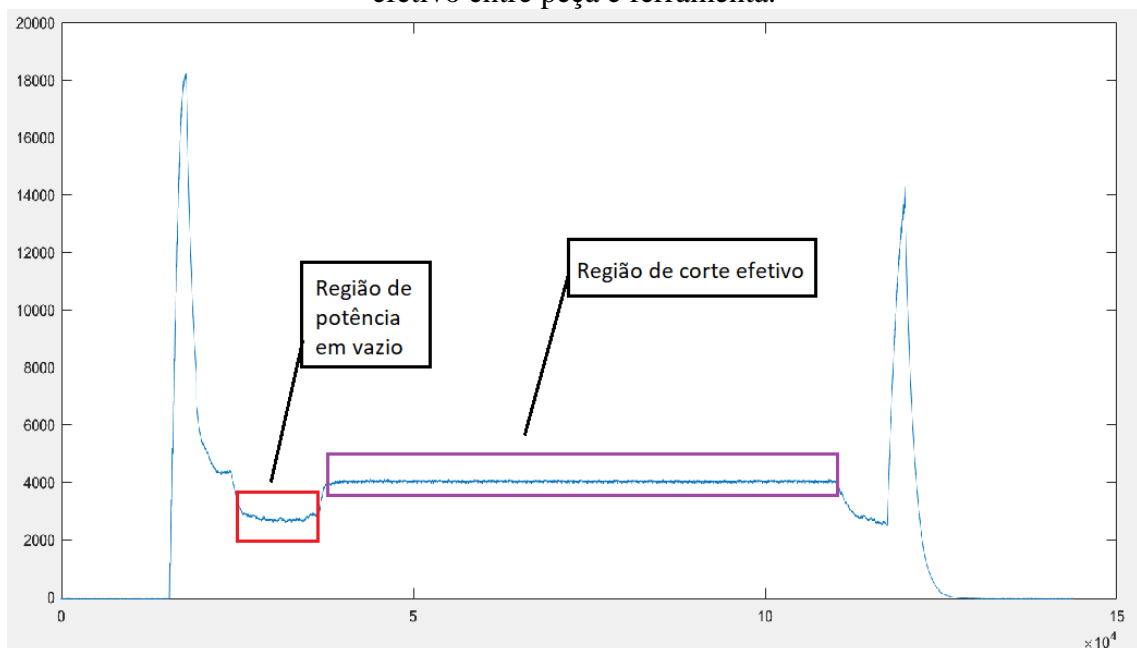
Onde U_{cc} é o sinal emitido pelos sensores.

Utilizando o software MATLAB® R2022b, foi possível gerar gráficos representando a emissão acústica, potência e vibração. Contudo, para obtenção dos dados durante o

processo de torneamento, foi crucial delimitar a região onde o corte estava efetivamente ocorrendo. Isso requereu a identificação e, subsequente, subtração da potência em vazio, que corresponde à energia consumida na operação do CNC sem envolver o corte propriamente dito.

Na figura 14, pode ser observado um exemplo da região onde está localizada a potência em vazio e a região onde ocorre o contato efetivo de corte entre a ferramenta de corte cerâmica e a peça de ferro fundido.

Figura 14 – Exemplo de gráfico mostrando a região de potência em vazio e região de corte efetivo entre peça e ferramenta.



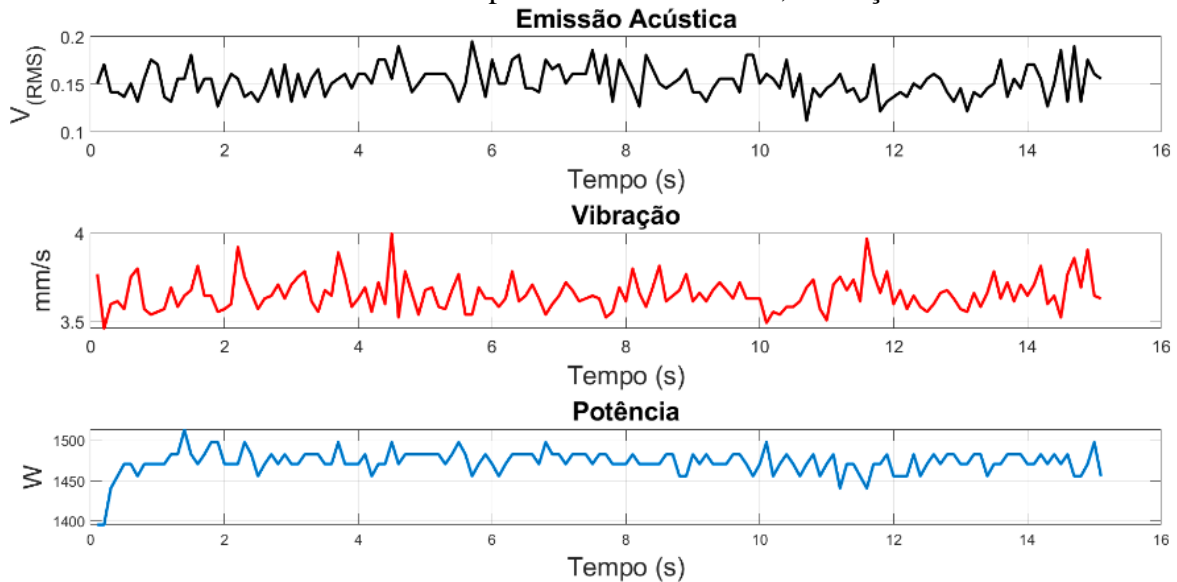
Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Depois de identificar a região em que ocorre a remoção de material de forma efetiva, foram gerados gráficos de potência, emissão acústica e vibração, conforme pode ser visto na Figura 15. O programa computou os valores médios e máximos da potência de corte, da emissão acústica e da vibração durante os momentos em que houve contato real entre a ferramenta e a peça em cada ensaio realizado. Estes valores foram então empregados na análise da influência dos parâmetros de corte nas respostas correspondentes.

Os dados obtidos de potência, emissão acústica e vibração, tanto máxima, quanto média foram analisados estatisticamente por meio do software MINITAB 18, que possui ferramentas que possibilitam a aplicação do método de Taguchi, realização da análise de variância (ANOVA) para identificação dos efeitos sobre as médias das variáveis resposta e

da razão sinal/ruído S/N. Também permitiu a aplicação do teste de Tukey para análise de diferenças significativas entre os níveis.

Figura 15 – Exemplo dos gráficos gerados pelo programa de tratamento de dados feito com o software MATLAB® do Ensaio 1 para Emissão Acústica, Vibração e Potência Máxima.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

3.6 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Utilizando o método de Taguchi como planejamento de experimento, através de um arranjo ortogonal L_9 , avaliando 3 níveis para cada fator. Para velocidade de corte (V_c) 350, 450 e 550 m/min, avanço (f) de 0,1, 0,15 e 0,2 mm/rev e profundidade de corte (a_p) de 0,25, 0,5 e 0,75 mm.

O arranjo ortogonal L_9 foi realizado com 9 experimentos e 3 réplicas, resultando em 27 experimentos totais, para análise do inserto cerâmico com as respectivas variáveis de saída de emissão acústica (V_{RMS}), potência de usinagem (W), vibração (mm/s). A figura 13 mostra a matriz com os experimentos realizados. As combinações testadas podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3 - Matriz de experimento do arranjo ortogonal de Taguchi L₉ para o ensaio de inserto cerâmico de alumina.

| Combinação experimental | V _c (m/min) | f (mm/rev) | a _p (mm) |
|-------------------------|------------------------|------------|---------------------|
| 1 | 500 | 0,1 | 0,25 |
| 2 | 500 | 0,15 | 0,5 |
| 3 | 500 | 0,2 | 0,75 |
| 4 | 450 | 0,1 | 0,5 |
| 5 | 450 | 0,15 | 0,75 |
| 6 | 450 | 0,2 | 0,25 |
| 7 | 550 | 0,1 | 0,75 |
| 8 | 550 | 0,15 | 0,25 |
| 9 | 550 | 0,2 | 0,5 |

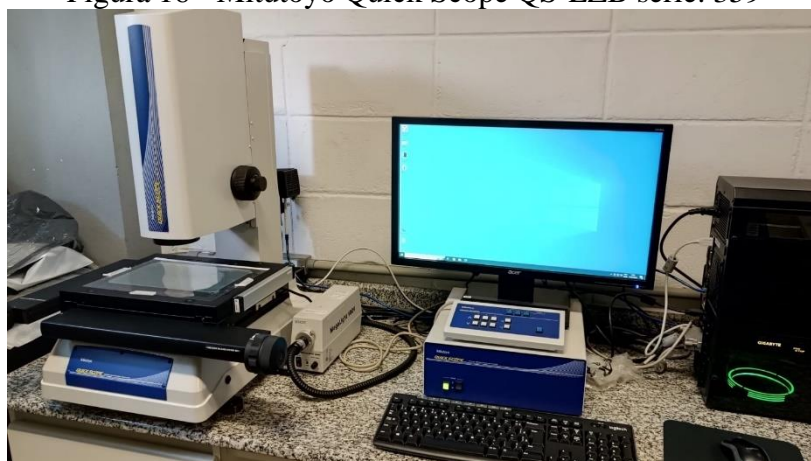
Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Os ensaios foram planejados de tal forma que o comprimento de corte fosse constante para cada ensaio, para assim garantir a precisão dos dados analisados.

3.7 MEDIÇÃO DO DESGASTE DA FERRAMENTA

A medição do desgaste da ferramenta foi realizado através do sistema de medição 2D Mitutoyo Quick Scope QS-LZB serie. 359. Ele possibilita a ampliação e visualização da região onde a ferramenta sofreu desgaste durante o processo de torneamento. O sistema está relacionado ao sistema de software QSPAK, que possibilita fazer o controle de iluminação e medição do desgaste de flanco máximo (V_b). Na figura 16 podem ser vistos o sistema de medição utilizado nesse trabalho.

Figura 16 - Mitutoyo Quick Scope QS-LZB serie. 359



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS VARIÁVEIS DE SAÍDA

Nesta seção, apresenta-se as análises estatísticas empregadas nos experimentos para o estudo dos efeitos dos parâmetros de entrada, velocidade de corte, velocidade de avanço e profundidade de corte sobre as variáveis de resposta rugosidade R_a e R_t , potência de usinagem, emissão acústica, vibração e desgaste de flanco. Para essa avaliação, utilizou-se a ANOVA com um nível de significância de 95% de confiabilidade. Além disso, em determinados casos, aplicou-se o teste de Tukey para analisar diferenças significativas nas respostas entre os níveis dos parâmetros analisados.

4.1.1 Rugosidade R_a e R_t

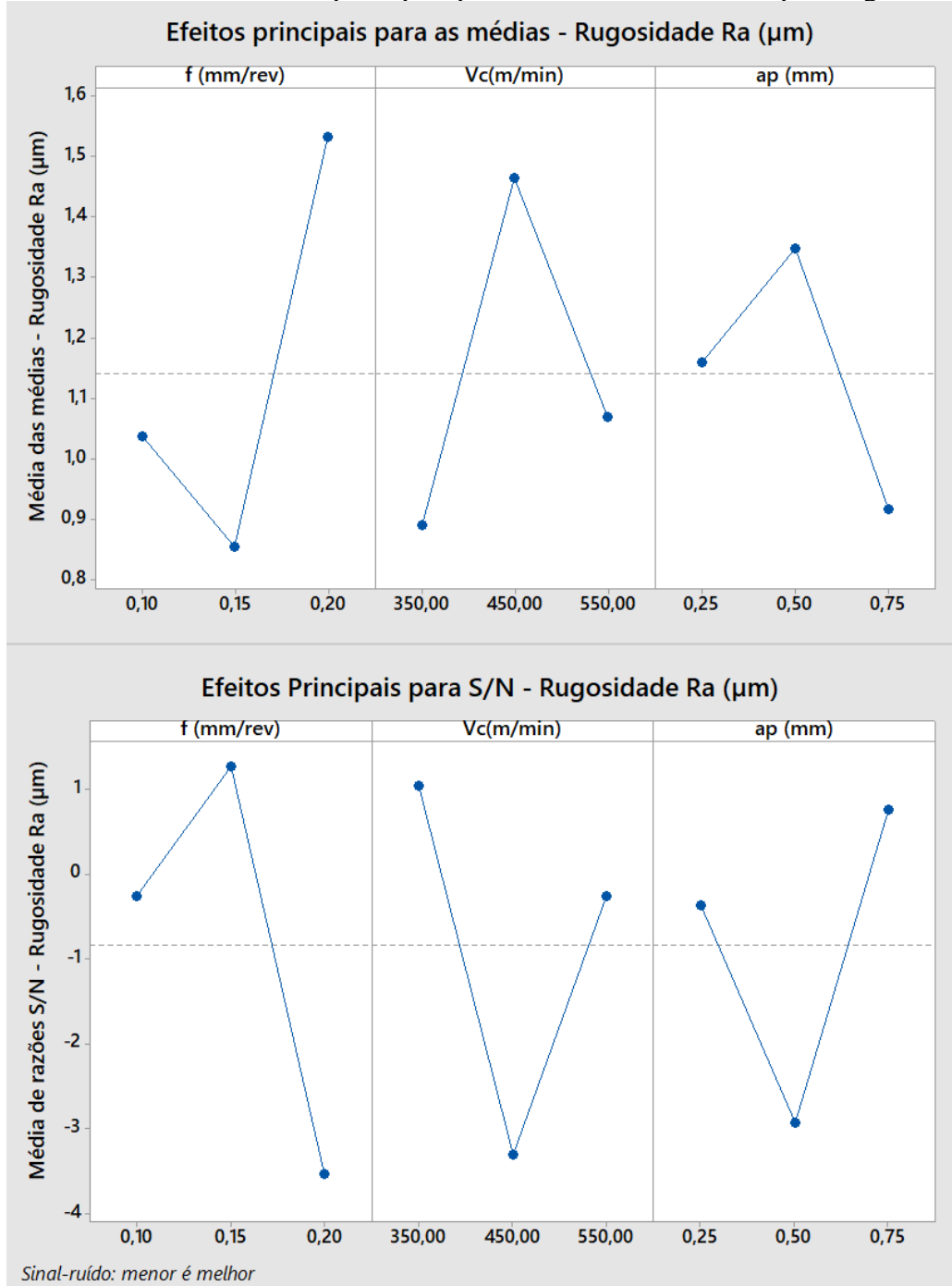
A análise dos efeitos principais das médias para as rugosidades R_a e R_t podem ser observados, respectivamente, nas Figuras 15 e 16. A linha média tracejada representa a média das médias para R_a , com valor de $1,14 \mu\text{m}$, enquanto para R_t , o valor médio das médias foi de $9,53 \mu\text{m}$. Nas figuras também são apresentados os valores da razão sinal ruído com as variáveis consideradas “menor é melhor”.

Com base nos fatores analisados, os valores que apontam para a minimização da rugosidade R_a foram $V_c = 350 \text{ m/min}$, $a_p = 0,75 \text{ mm}$ e $f = 0,15 \text{ mm/volta}$, enquanto para a rugosidade R_t , os valores ideais foram $V_c = 550 \text{ m/min}$, $a_p = 0,25 \text{ mm}$ e $f = 0,1 \text{ mm/volta}$, considerando a usinagem a seco.

Além disso, realizou-se as análises de variância (ANOVA) para média e S/N de R_a e para R_t , conforme Figuras 17 e 18 com propósito de avaliar quais parâmetros foram estatisticamente significativos para rugosidade R_a e R_t .

A análise de variância (ANOVA) para a rugosidade R_a demonstrou que nenhum dos fatores apresentou significância estatística. Analisou-se que o avanço contribuiu com 45,16%, a velocidade de corte com 31,65% e a profundidade de corte com 17,25%, respectivamente. De forma semelhante, ao analisar a rugosidade R_t por meio da ANOVA, não foi identificado nenhum parâmetro estatisticamente significativo. Os resultados revelaram que o avanço teve uma contribuição de 46,83%, a profundidade de corte de 29,72% e a velocidade de corte de 11,37%., informações que podem ser observadas na tabela 4, tabela 5, tabela 6 e tabela 7.

Figura 17 - Análise dos efeitos principais para as médias e sinal ruído para rugosidade Ra

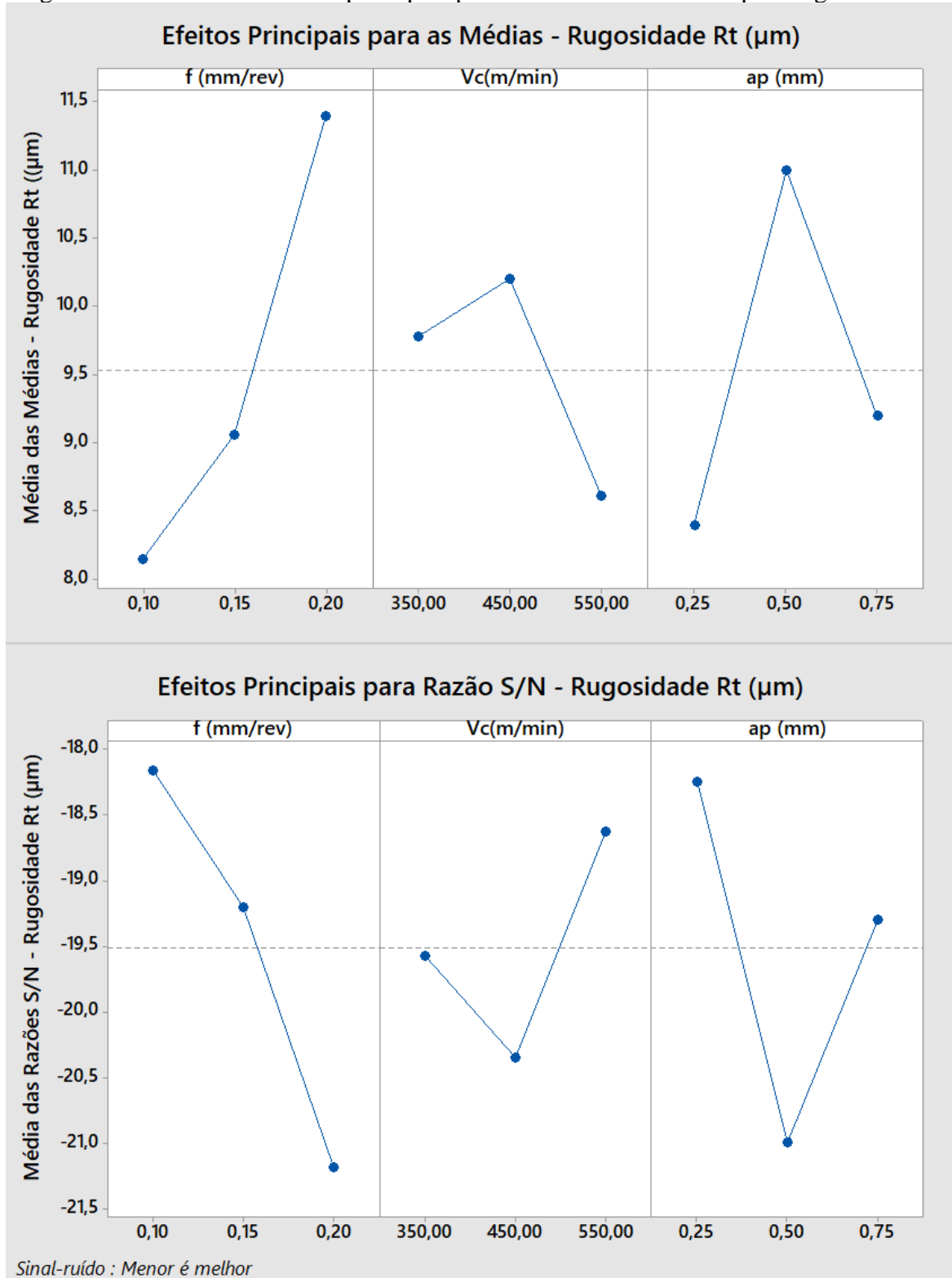


Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Um ponto crucial a ser considerado é que, de acordo com Menten e Phadke (1991), o valor de F oferece informações importantes. Quando o valor de F é inferior a 1, isso sugere que o efeito em questão é menor do que o erro experimental. Por outro lado, quando o valor de F ultrapassa 2, o efeito não pode ser considerado pequeno e merece atenção. Quando o valor de F excede 4, indica que o efeito é substancialmente significativo e deve ser levado em consideração, essa consideração também será utilizada para as análises das outras

variáveis. Tendo em mente essa orientação, é pertinente examinar o impacto do avanço e da velocidade de corte na rugosidade R_a .

Figura 18 - Análise dos efeitos principais para as média e sinal ruído para rugosidade R_t .



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Tabela 4 - ANOVA das médias para rugosidade R_a .

| Fonte | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P | Contribuição |
|---------------|----|---------|---------|---------|------|-------|--------------|
| f(mm/rev) | 2 | 0,73826 | 0,73826 | 0,36913 | 7,59 | 0,116 | 45,16% |
| Vc(m/min) | 2 | 0,51738 | 0,51738 | 0,25869 | 5,32 | 0,158 | 31,65% |
| ap(mm) | 2 | 0,28197 | 0,28197 | 0,14098 | 2,9 | 0,257 | 17,25% |
| Erro Residual | 2 | 0,09731 | 0,09731 | 0,04865 | | | |
| Total | 8 | 1,63491 | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Tabela 5 - ANOVA de S/N para rugosidade R_a .

| Fonte | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P | Contribuição |
|---------------|----|--------|--------|--------|------|-------|--------------|
| f(mm/rev) | 2 | 36,215 | 36,215 | 18,108 | 5,08 | 0,164 | 38,25% |
| Vc(m/min) | 2 | 29,872 | 29,872 | 14,936 | 4,19 | 0,193 | 31,52% |
| ap(mm) | 2 | 21,472 | 21,427 | 10,736 | 3,01 | 0,249 | 25,84% |
| Erro Residual | 2 | 7,129 | 7,129 | 3,564 | | | |
| Total | 8 | 94,688 | | | | | |

Fonte : Elaborado pelo próprio autor (2024)

Tabela 6 – Análise de variância ANOVA das médias para Rugosidade R_t .

| Fonte | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P | Contribuição |
|----------------|----|--------|--------|--------|------|-------|--------------|
| f(mm/rev) | 2 | 16,827 | 16,827 | 8,413 | 3,87 | 0,205 | 46,83% |
| Vc(m/min) | 2 | 4,084 | 4,084 | 2,042 | 0,94 | 0,515 | 11,37% |
| ap(mm) | 2 | 10,679 | 10,679 | 5,34 | 2,46 | 0,289 | 29,72% |
| Residual Error | 2 | 4,344 | 4,344 | 2,172 | | | |
| Total | 8 | 35,934 | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Tabela 7 – Análise de variância ANOVA das médias para Rugosidade R_t .

| Fonte | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P | Contribuição |
|---------------|----|--------|--------|--------|------|-------|--------------|
| f(mm/rev) | 2 | 14,15 | 14,15 | 7,075 | 3,28 | 0,234 | 41,08% |
| Vc(m/min) | 2 | 4,455 | 4,455 | 2,227 | 1,03 | 0,492 | 12,93% |
| ap(mm) | 2 | 11,518 | 11,518 | 5,759 | 2,67 | 0,273 | 33,44% |
| Erro Residual | 2 | 4,32 | 4,32 | 2,16 | | | |
| Total | 8 | 34,443 | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Ao conduzir uma análise estatística de Tukey com 95% de confiabilidade para avaliar a existência de diferenças significativas entre os níveis dos fatores, para letras diferentes existem diferenças estatisticamente significativas entre os níveis. Verificou diferenças significativa nos níveis de avanço da rugosidade R_a e R_t como verificado nas tabelas 8 e 9, respectivamente.

Tabela 8 – Teste de Tukey para os fatores com relação a variável resposta R_a .

| Fator | Nível | Grupo |
|------------------------------|--------------|--------------|
| Velocidade de corte | 350 | A |
| | 450 | A |
| | 550 | A |
| Avanço | 0,1 | AB |
| | 0,15 | B |
| | 0,2 | A |
| | 0,25 | A |
| Profundidade de Corte | 0,50 | A |
| | 1 | A |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Tabela 9 - Teste de Tukey para os fatores com relação a variável resposta R_t

| Fator | Nível | Grupo |
|------------------------------|--------------|--------------|
| Velocidade de corte | 350 | A |
| | 450 | A |
| | 550 | A |
| Avanço | 0,1 | A |
| | 0,15 | AB |
| | 0,2 | A |
| | 0,25 | A |
| Profundidade de Corte | 0,50 | A |
| | 1 | A |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Verifica-se que existe diferença significativa segundo o teste de Tukey entre os níveis de avanço de 0,15 e 0,20. O nível de avanço de 0,15 mm/rot é aquele que ofereceu menor rugosidade R_a .

Verifica-se que existe diferença significativa segundo o teste de Tukey entre f de 0,10 e 0,20 mm/rot. Sendo o melhor cenário quanto rugosidade R_t o avanço de 0,10 mm/rot.

Assim, ao considerar tanto a perspectiva de Phadke quanto os resultados do teste de Tukey, torna-se evidente que o avanço é um fator significativo dentro do sistema em análise para as variáveis de saída de rugosidade. Em resumo, os dados indicaram que a utilização de avanços menores resultou em valores mais baixos de rugosidade R_a e R_t , o que implica que, no contexto do processo de usinagem com ferramentas de corte cerâmicas, a adoção de avanços menores pode levar a um acabamento superficial mais refinado, em consonância com as observações encontradas na literatura sobre o torneamento de ferro fundido, todas essas seriam hipóteses que precisariam ser investigadas (Kondo, 2019; França, 2020; Sousa, 2020; Sousa, 2013).

O valor obtido para a rugosidade superficial R_a de 1,14 μm representa um desempenho satisfatório em termos de acabamento quando comparado com estudos semelhantes. (Sousa *et al*, 2022 ; Camuscu , 2005) Este resultado destaca uma baixa rugosidade superficial, o que é particularmente relevante dada a complexidade de usinagem associada a esse material. Contudo, é crucial observar que o parâmetro R_t , com uma média de 9,53 μm , apresenta uma elevação mais significativa.

O ferro fundido nodular exibe uma microestrutura nodular, e análises indicam que a morfologia dos grãos de grafite se modifica durante o processo de usinagem, com os nódulos alongando-se na direção do fluxo do cavaco. (Sousa *et al*, 2017). Isso implica em uma maior facilidade de deformação ao longo dos limites de grão do ferro fundido, além disso, diversos outros fatores, como a heterogeneidade do material de trabalho e a distribuição aleatória dos nódulos de grafite, características proeminentes no ferro fundido nodular, podem impactar diretamente as rugosidades superficiais.(Sousa *et al*, 2022)

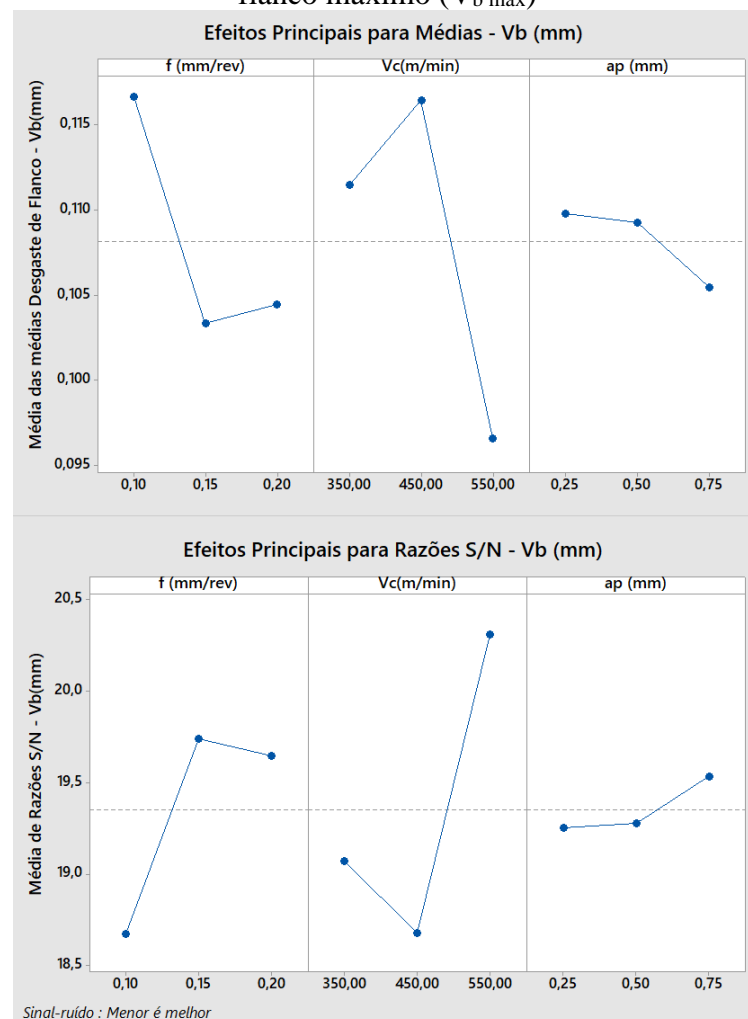
4.1.2 Desgaste de flanco máximo ($V_{b \max}$)

O desgaste de flanco, representado como V_b , foi quantificado e submetido à análise em relação aos efeitos principais das médias e S/N , conforme apresentado na Figura 19. A linha tracejada, que representa a média das médias, encontra-se em 0,108 mm, e os valores que levaram à minimização do desgaste de flanco foram $V_c = 550$ m/min, $a_p = 0,75$ mm e $f = 0,15$ mm/volta.

De acordo com a tabela 10, verifica-se, através da ANOVA para as médias, que a velocidade de corte foi o fator com maior contribuição de 59,88% seguido o avanço com 30,59% e profundidade de corte com 3,078% para o efeito de desgaste de flanco. Além disso, na tabela 11 apresenta-se a ANOVA para S/N.

Fazendo a análise estatística comparativa de Tukey, para verificação de diferença significativa entre os níveis de fatores, para V_c verifica-se diferença significativa entre 350m/min e 450 m/min com 550 m/min. Além disso, verifica-se diferença significativa também no avanço entre o nível 0,10 e 0,15, sendo a melhor situação de 0,15 mm/rot de avanço. Esses dados podem ser verificados na Tabela 12.

Figura 19 – Análise dos efeitos principais para as média e sinal ruído para desgaste de flanco máximo ($V_b \text{ max}$)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Tabela 10 – Análise de variância ANOVA para médias do desgaste de flanco máximo

| Fonte | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P | Contribuição |
|---------------|----|----------|----------|----------|------|-------|--------------|
| f(mm/rev) | 2 | 0,000328 | 0,000328 | 0,000164 | 4,81 | 0,172 | 30,59% |
| Vc(m/min) | 2 | 0,000642 | 0,000642 | 0,000321 | 9,41 | 0,096 | 59,88% |
| ap(mm) | 2 | 0,000033 | 0,000033 | 0,000017 | 0,49 | 0,672 | 3,08% |
| Erro Residual | 2 | 0,000068 | 0,000068 | 0,000034 | | | |
| Total | 8 | 0,001072 | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Tabela 11- Análise de variância ANOVA para S/N do desgaste de flanco máximo

| Fonte | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P | Contribuição |
|---------------|----|--------|--------|---------|------|-------|--------------|
| f(mm/rev) | 2 | 2,0907 | 2,0907 | 1,04537 | 3,84 | 0,207 | 29,32% |
| Vc(m/min) | 2 | 4,3527 | 4,3527 | 2,17634 | 7,99 | 0,111 | 61,04% |
| ap(mm) | 2 | 0,1424 | 0,1424 | 0,07118 | 0,26 | 0,793 | 2,00% |
| Erro Residual | 2 | 0,5446 | 0,5446 | 0,27228 | | | |
| Total | 8 | 7,1304 | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Tabela 12 – Teste de Tukey para os fatores com relação a variável resposta $V_{b \max}$

| Fator | Nível | Grupo |
|------------------------------|-------|-------|
| Velocidade de corte | 350 | A |
| | 450 | A |
| | 550 | B |
| Avanço | 0,1 | A |
| | 0,15 | B |
| | 0,2 | AB |
| | 0,25 | A |
| Profundidade de Corte | 0,50 | A |
| | 1 | A |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

A utilização de elevadas velocidades de corte resulta em um aumento considerável na quantidade de calor absorvida tanto pela ferramenta de corte quanto pela peça em processo de usinagem. Este fenômeno é notório devido às propriedades excepcionais da cerâmica empregada na fabricação da ferramenta, que englobam elevada resistência térmica,

resistência química e capacidade de suportar o desgaste. Essas características da cerâmica promovem uma forma de lubrificação.

Essas características da cerâmica promovem uma forma de lubrificação natural, geralmente sob a forma de uma camada de grafite, que se desenvolve durante o procedimento de usinagem de materiais de ferro fundido. Essa camada de lubrificação exerce um efeito substancial na redução do atrito entre a ferramenta de corte e a peça, resultando na minimização do desgaste dessas superfícies (Sousa, 2022).

Esse padrão foi amplamente documentado na literatura especializada, onde é observado que, ao aumentar as velocidades de corte durante a usinagem de ferro fundido com ferramentas de cerâmica avançada, há uma correlação direta com a redução do desgaste das ferramentas. Além disso, é importante notar que quanto maior a velocidade de corte, maior o calor gerado na interface entre a peça e a ferramenta. À medida que a temperatura aumenta, ocorre uma tendência de melhora na usinabilidade do material, caracterizada pela redução da sua dureza e pelo aumento da tenacidade. Um aspecto adicional relevante é que a cerâmica específica utilizada na ferramenta é capaz de manter a sua dureza mesmo em temperaturas elevadas, o que cria um ambiente propício para a usinagem em velocidades mais altas.

Tudo isso ressalta a importância crítica da escolha criteriosa dos materiais e das condições de corte para otimizar o processo de usinagem e prolongar a vida útil das ferramentas de corte.

Quanto ao avanço, observou-se uma ocorrência atípica em relação ao padrão geralmente encontrado na literatura (Sousa, 2022). Normalmente, aumento nos avanços está associado a um aumento no desgaste da ferramenta. No entanto, nesta situação específica, a adoção de um avanço intermediário revelou-se a escolha mais vantajosa.

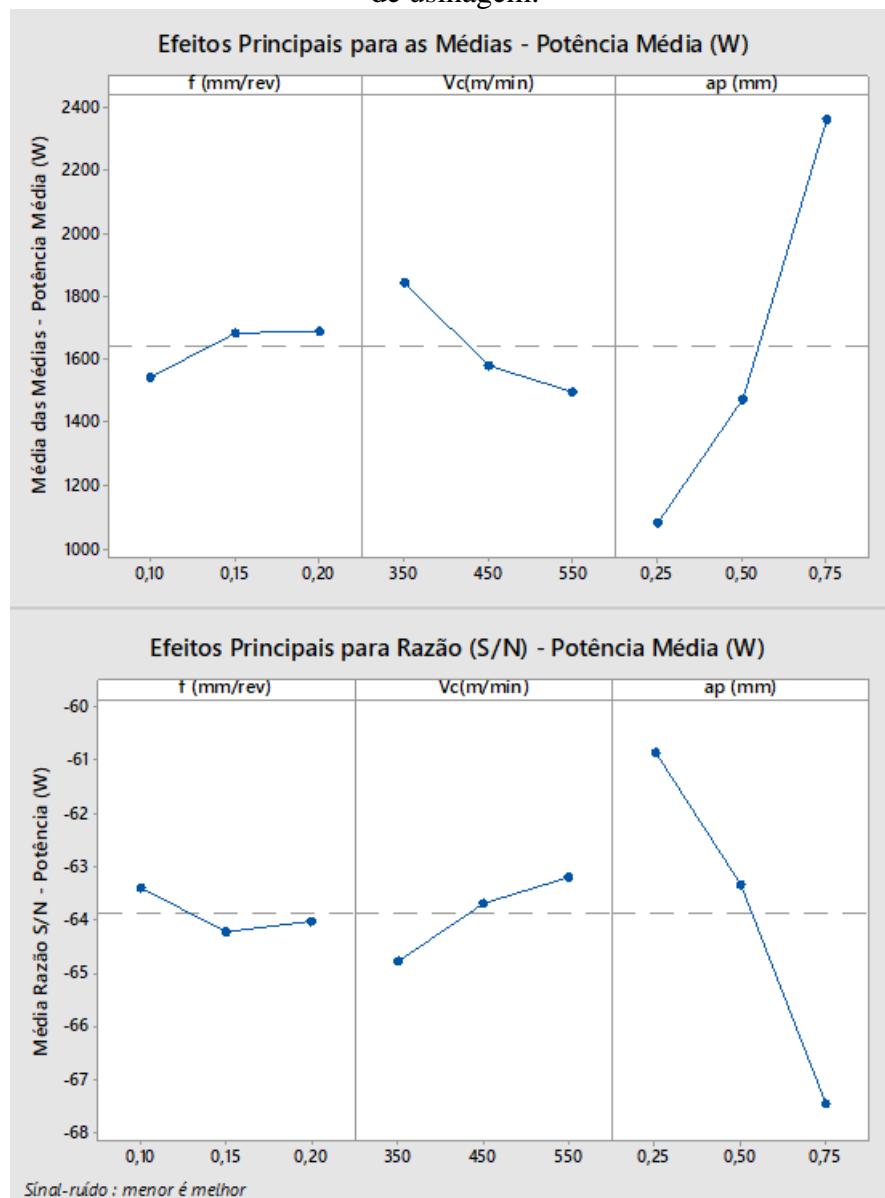
É relevante destacar que um avanço maior resulta em um menor tempo de contato entre a ferramenta e a peça a cada rotação. Isso, por sua vez, pode reduzir as oportunidades para que os mecanismos de desgaste, como a abrasão, afetem a ferramenta. Em alguns cenários, um avanço mais elevado pode, de fato, proporcionar uma remoção de material mais eficiente, permitindo que a ferramenta execute cortes mais rápidos, o que, por sua vez, minimiza a fricção e o atrito que contribuem para o desgaste, porém todas essas são hipóteses dos fenômenos que podem ter ocorrido durante o processo, sendo necessário devida investigação deles.

4.1.3 Potência média de usinagem

A potência média de usinagem foi submetida à análise em relação aos efeitos principais das médias e da razão S/N, conforme apresentado na Figura 20, e apresentou a linha centro do gráfico das médias em 1640 W. A melhor condição menor é melhor foram para os valores de V_c de 550 m/min, f de 0,1 mm/rot e a_p de 0,25 mm são os fatores que minimizam a potência média de corte.

Foi realizada a ANOVA para média e S/N, para analisar quais fatores influenciaram significativamente a variável, presentes nas tabelas 13 e 14.

Figura 20 – Análise dos efeitos principais para as média e sinal ruído para potência média de usinagem.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Conforme a ANOVA da Figura 26, verifica-se que o único fator estatisticamente significativo foi a profundidade de corte, com 89,07% de contribuição. O avanço e velocidade de corte não tiveram efeitos significativos para o valor da razão S/N de potência média de usinagem.

Tabela 13 - Análise de variância ANOVA para médias da potência média de usinagem.

| Fonte | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P | Contribuição |
|---------------|----|---------|---------|---------|-------|-------|--------------|
| f (mm/rev) | 2 | 41908 | 41908 | 20954 | 0,52 | 0,656 | 1,14% |
| Vc(m/min) | 2 | 194689 | 194689 | 97345 | 2,43 | 0,291 | 6,79% |
| ap (mm) | 2 | 2581358 | 2581358 | 1290679 | 32,25 | 0,03 | 89,07% |
| Erro Residual | 2 | 80043 | 80043 | 40021 | | | |
| Total | 8 | 2897999 | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Tabela 14 - Análise de variância ANOVA para S/N da potência média de usinagem.

| Fonte | DF | Seq SS | Adj SS | Adj MS | F | P | Contribuição |
|---------------|----|--------|--------|---------|-------|-------|--------------|
| f (mm/rev) | 2 | 1,113 | 1,113 | 0,5566 | 0,44 | 0,696 | 1,50% |
| Vc(m/min) | 2 | 3,889 | 3,889 | 1,9447 | 1,53 | 0,395 | 5,25% |
| ap (mm) | 2 | 66,551 | 66,551 | 33,2754 | 26,17 | 0,037 | 89,82% |
| Erro Residual | 2 | 2,543 | 2,543 | 1,2715 | | | |
| Total | 8 | 74,096 | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

4.1.4 Potência máxima de usinagem

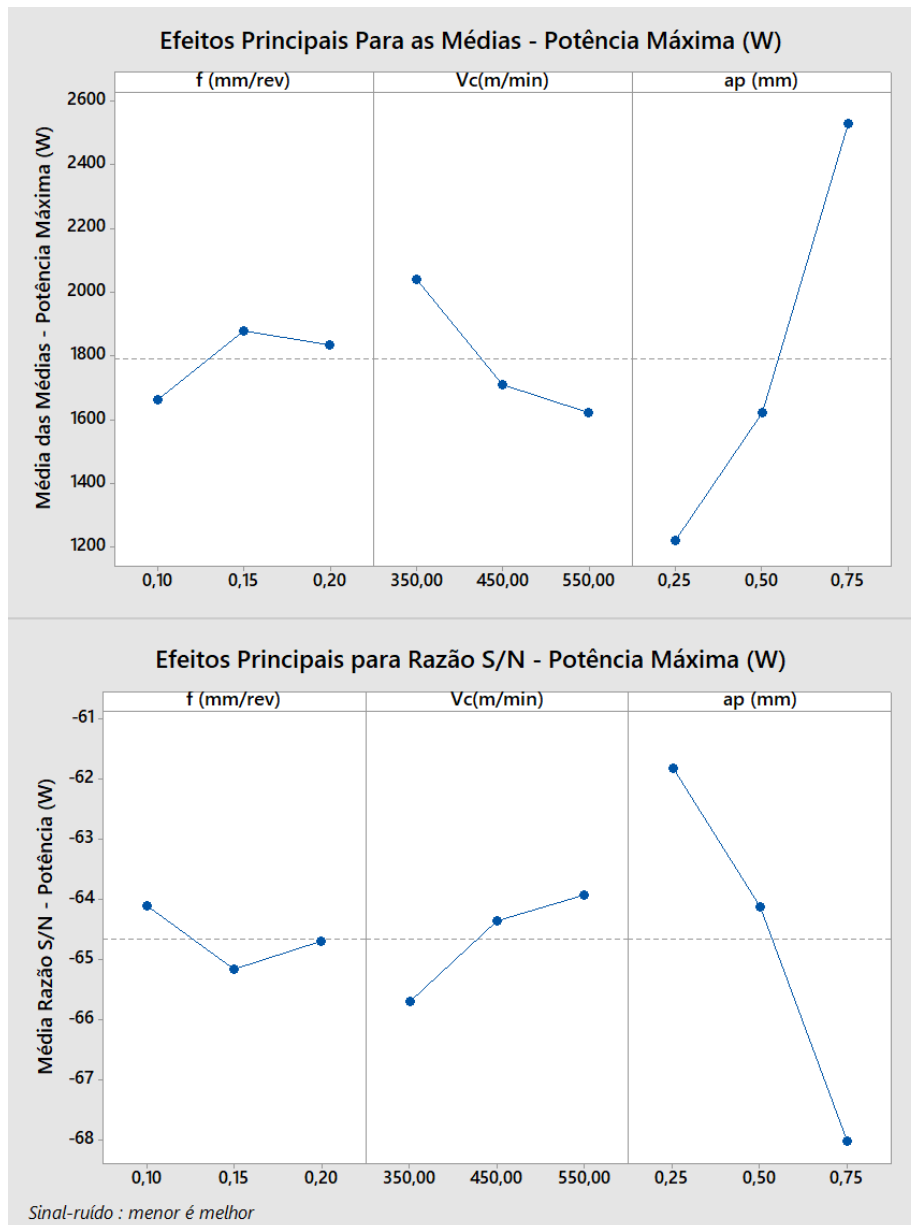
A potência máxima de usinagem foi submetida à análise em relação aos efeitos principais das médias e S/N, conforme apresentado na Figura 21 e apresentou a linha centro do gráfico das médias em 1789 W. A melhor condição menor é melhor foram para os valores de V_c de 550 m/min, f de 0,10 mm/volta e a_p de 0,25 mm são os fatores que minimizam a potência máxima de corte.

Foi realizada a ANOVA para média e S/N, para analisar quais fatores influenciaram significativamente a variável, conforme pode ser visto nas tabelas 15 e 16.

Conforme verificado na Figura 28, o único fator estatisticamente significativo foi a profundidade de corte, com 85,80% de contribuição. O avanço e velocidade de corte não foram significativos para variabilidade do processo para potência máxima.

Algumas possíveis explicações em verificar melhor condições para potência de corte em menores profundidade de corte são: primeiro, as ferramentas cerâmicas são reconhecidas pela sua resistência ao desgaste, tornando-as adequadas para materiais duros como o ferro fundido nodular. No entanto, ao aumentar a profundidade de corte, essas ferramentas são submetidas a cargas mecânicas mais intensas e geram mais calor, acelerando o desgaste e exigindo maior potência para manter a eficiência do processo.

Figura 21 - Análise dos efeitos principais para as média e sinal ruído para potência máxima de corte



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Tabela 15- Análise de variância ANOVA para médias da potência máxima de corte.

| Fonte | DF | SeqSS | AdjSS | AdjMS | F | P | Contribuição |
|---------------|----|---------|---------|---------|-------|-------|--------------|
| f(mm/rev) | 2 | 78501 | 78501 | 39250 | 1,04 | 0,491 | 2,51% |
| Vc(m/min) | 2 | 290416 | 290416 | 145208 | 3,83 | 0,207 | 9,27% |
| ap(mm) | 2 | 2686861 | 2686861 | 1343430 | 35,44 | 0,027 | 85,80% |
| Erro Residual | 2 | 75808 | 75808 | 37904 | | | |
| Total | 8 | 3131586 | | | | | |

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2024)

Tabela 16 - Análise de variância ANOVA para S/N da potência máxima de corte.

| Fonte | DF | SeqSS | AdjSS | AdjMS | F | P | Contribuição |
|---------------|----|--------|--------|---------|-------|-------|--------------|
| f(mm/rev) | 2 | 1,656 | 1,656 | 0,8282 | 0,87 | 0,535 | 2,44% |
| Vc(m/min) | 2 | 5,134 | 5,134 | 2,5671 | 2,69 | 0,271 | 7,58% |
| ap(mm) | 2 | 59,009 | 59,009 | 29,5044 | 30,92 | 0,031 | 87,15% |
| Erro Residual | 2 | 1,909 | 1,909 | 0,9543 | | | |
| Total | 8 | 67,708 | | | | | |

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2024)

Segundo, a usinagem envolve a remoção de material, o que gera calor devido ao atrito e deformação do material. Uma profundidade de corte mais profunda resulta em uma maior quantidade de calor, podendo prejudicar a vida útil da ferramenta e requerer uma maior potência para sustentar a operação de corte.

Terceiro, o aumento na profundidade de corte também implica em forças de corte mais intensas atuando na ferramenta, demandando mais energia do motor da máquina para manter a rotação e a alimentação necessárias.

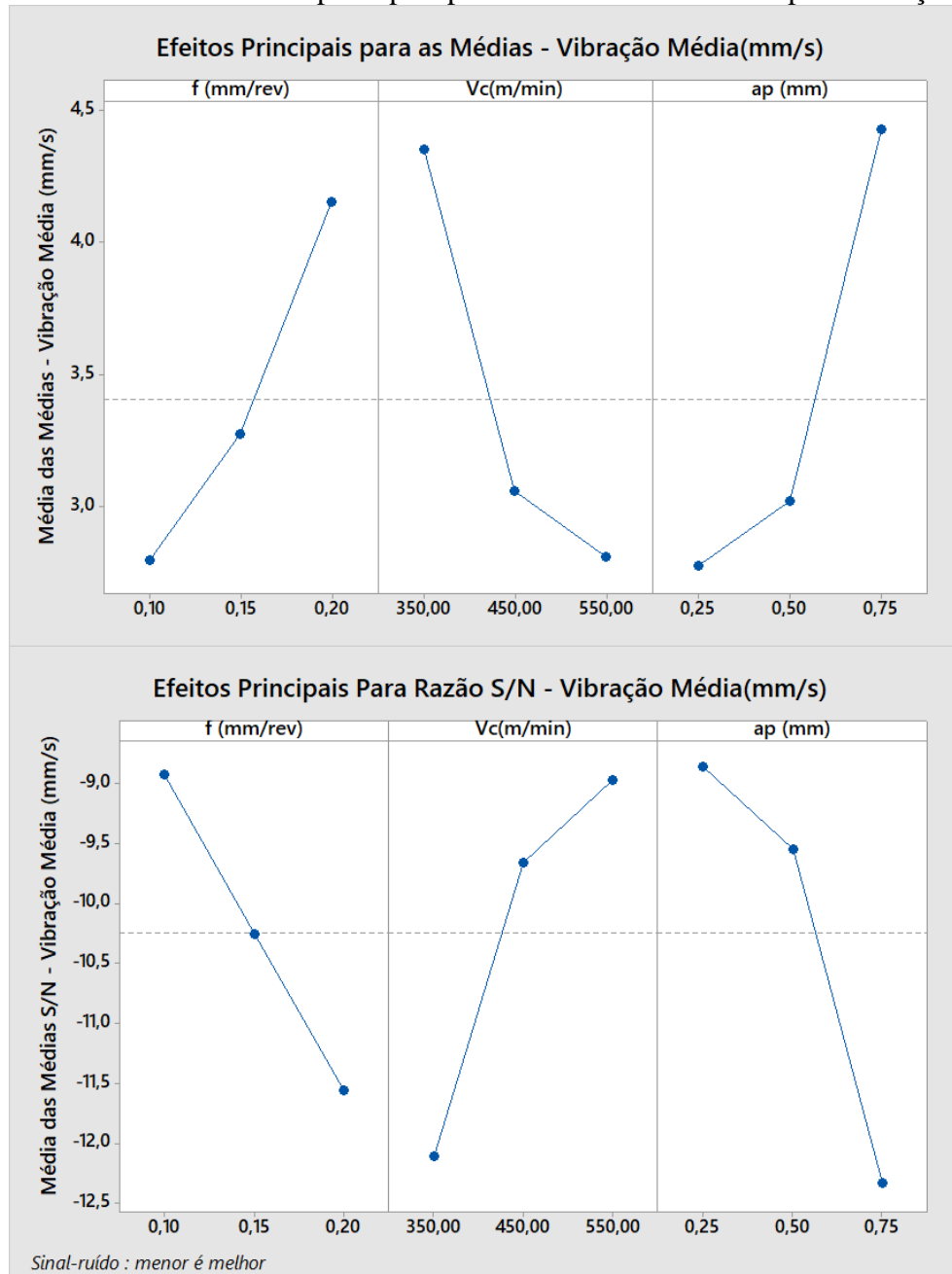
Por fim, à medida que a profundidade de corte aumenta, a ferramenta permanece em contato com o material por um período prolongado, levando a um desgaste por abrasão mais significativo, esse desgaste adicional pode resultar em uma maior potência de corte, à medida que a ferramenta perde sua geometria eficaz de corte. Todas essas são hipóteses de causas potenciais que necessitariam de investigação para sua verificação.

4.1.5 Vibração média

A vibração média foi submetida à análise em relação aos efeitos principais das médias e S/N, conforme apresentado na Figura 22 e apresentou a linha centro do gráfico das médias em 3,407 mm/s. A melhor condição “menor é melhor” foram para os valores de V_c de 550

m/min, f de 0,10 mm/volta e a_p de 0,25 mm são os fatores que minimizam a variabilidade da potência máxima de usinagem.

Figura 22 - Análise dos efeitos principais para as médias e sinal ruído para vibração média.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Foi realizada a ANOVA para média e S/N, para analisar quais fatores influenciaram significativamente a variável, conforme visto nas tabelas 17 e 18.

Tabela 17 - Análise de variância ANOVA para médias da vibração média.

| Fonte | DF | SeqSS | AdjSS | AdjMS | F | P | Contribuição |
|---------------|----|-------|-------|-------|------|-------|--------------|
| f(mm/rev) | 2 | 2,831 | 2,831 | 1,415 | 1,22 | 0,45 | 20,18% |
| Vc(m/min) | 2 | 4,097 | 4,097 | 2,048 | 1,77 | 0,361 | 29,20% |
| ap(mm) | 2 | 4,791 | 4,791 | 2,395 | 2,07 | 0,326 | 34,15% |
| Erro Residual | 2 | 2,312 | 2,312 | 1,156 | | | |
| Total | 8 | 14,03 | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Tabela 18 - Análise de variância ANOVA para S/N da vibração média.

| Fonte | DF | SeqSS | AdjSS | AdjMS | F | P | Contribuição |
|---------------|----|--------|--------|--------|------|-------|--------------|
| f(mm/rev) | 2 | 10,324 | 10,324 | 5,162 | 1,53 | 0,395 | 19,29% |
| Vc(m/min) | 2 | 16,216 | 16,216 | 8,108 | 2,41 | 0,294 | 30,31% |
| ap(mm) | 2 | 20,211 | 20,211 | 10,105 | 3,00 | 0,25 | 37,78% |
| Erro Residual | 2 | 6,742 | 6,742 | 3,371 | | | |
| Total | 8 | 53,493 | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Verifica-se que pela análise de variância para vibração média que nenhum fator foi estatisticamente significativo, porém ao realizar-se o teste de Tukey verifica-se diferenças significativas em profundidade de corte, entre os níveis 0,25 mm e 0,50 mm com 0,75 mm, e para velocidade de corte entre os níveis 350 m/min e 550 m/min, como apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 - Teste de Tukey para os fatores com relação a variável resposta vibração média.

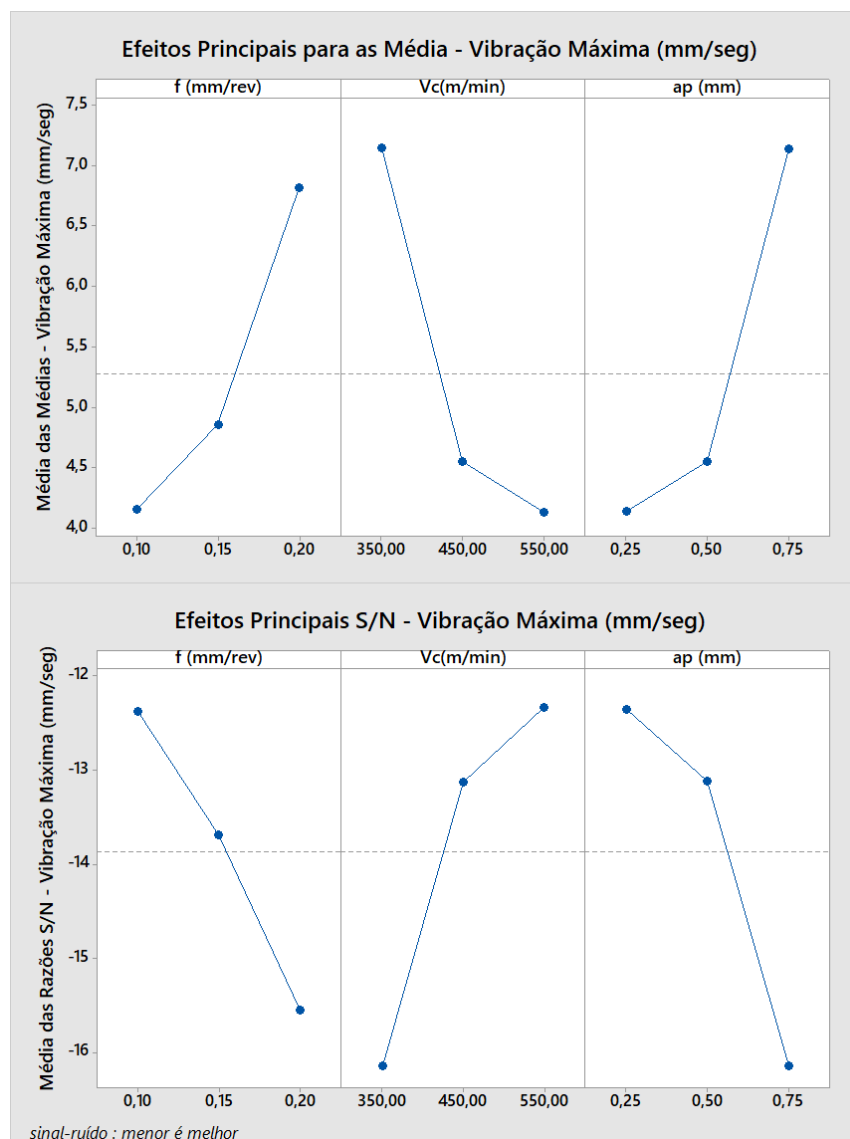
| Fator | Nível | Grupo |
|------------------------------|-------|-------|
| Velocidade de corte | 350 | A |
| | 450 | AB |
| | 550 | B |
| Avanço | 0,1 | A |
| | 0,15 | A |
| | 0,2 | A |
| Profundidade de Corte | 0,25 | B |
| | 0,5 | B |
| | 0,75 | A |

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2024)

4.1.6 Vibração máxima

A vibração máxima foi submetida à análise em relação aos efeitos principais das médias e S/N, conforme apresentado na Figura 23 e apresentou a linha centro do gráfico das médias em 5,277 mm/s. A melhor condição menor é melhor foram para os valores de V_c de 550 m/min, f de 0,10 mm/volta e a_p de 0,25 mm são os fatores que minimizam a potência máxima de corte.

Figura 23 - Análise dos efeitos principais para as média e sinal ruído para vibração máxima



Fonte: elaborado pelo próprio autor (2024)

Foi realizada a ANOVA para média e S/N, para analisar quais fatores influenciaram significativamente a vibração máxima, conforme pode ser visto nas tabelas 20 e 21.

Tabela 20 - Análise de variância ANOVA para médias da vibração máxima.

| Fonte | DF | SeqSS | AdjSS | AdjMS | F | P | Contribuição |
|---------------|----|-------|-------|-------|------|-------|--------------|
| f(mm/rev) | 2 | 11,46 | 11,46 | 5,732 | 1,12 | 0,472 | 21,41% |
| Vc(m/min) | 2 | 15,95 | 15,95 | 7,976 | 1,55 | 0,391 | 29,80% |
| ap(mm) | 2 | 15,86 | 15,86 | 7,93 | 1,55 | 0,393 | 29,63% |
| Erro Residual | 2 | 10,26 | 10,26 | 5,13 | | | |
| Total | 8 | 53,53 | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Tabela 21 - Análise de variância ANOVA para S/N da vibração máxima.

| Fonte | DF | SeqSS | AdjSS | AdjMS | F | P | Contribuição |
|---------------|----|-------|-------|--------|------|-------|--------------|
| f(mm/rev) | 2 | 15,29 | 15,29 | 7,645 | 1,32 | 0,432 | 20,32% |
| Vc(m/min) | 2 | 21,28 | 24,28 | 12,141 | 2,09 | 0,324 | 32,27% |
| ap(mm) | 2 | 24,28 | 24,03 | 12,014 | 2,07 | 0,326 | 31,94% |
| Erro Residual | 2 | 11,63 | 11,63 | 5,813 | | | |
| Total | 8 | 75,23 | | | | | |

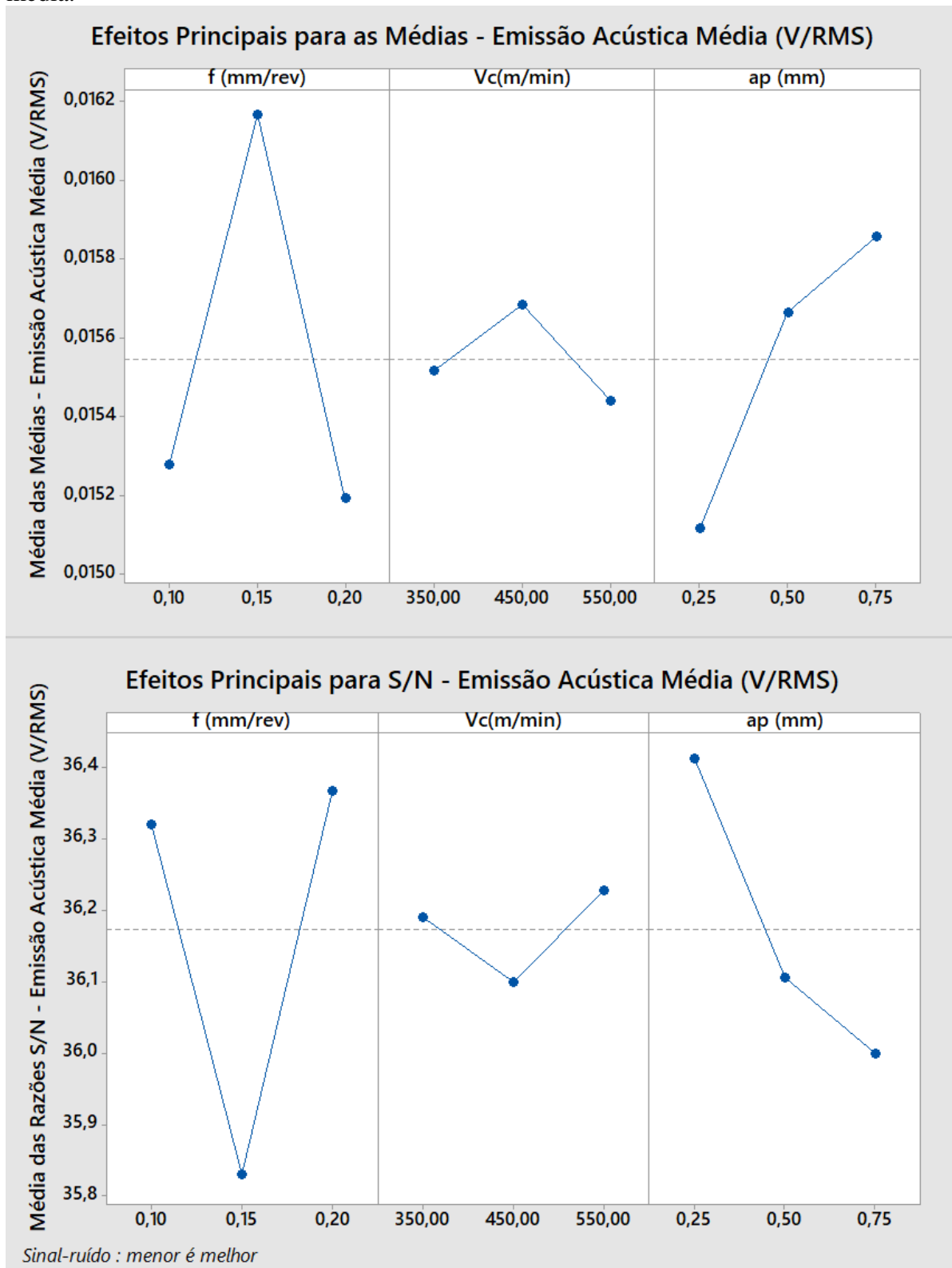
Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Avaliando o fator P verifica-se que nenhum fator foi estatisticamente significativo, porém aplicando o teste de Tukey verifica-se diferenças significativas nos níveis de velocidade de corte e profundidade de corte. Para velocidade de corte entre os níveis de 350 m/min e 550 m/min, sendo a melhor condição encontrada em $V_c = 550$ m/min. Para profundidade de corte entre os níveis de 0,25 mm e 0,75 mm, sendo melhor condição 0,25 mm.

4.1.7 Emissão acústica média

A emissão acústica média foi submetida à análise em relação aos efeitos principais das médias e S/N, conforme apresentado na Figura 24 e apresentou a linha centro do gráfico das médias em $0,0156 V_{RMS}$. A melhor condição menor é melhor foram para os valores de V_c de 550 m/min, f de 0,20 mm/volta e a_p de 0,25 mm são os fatores que minimizam a potência máxima de corte.

Figura 24 - Análise dos efeitos principais para as média e sinal ruído para emissão acústica média.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Foi realizada a ANOVA para média e S/N, para analisar quais fatores influenciaram significativamente a variável como apresentado nas tabelas 22 e 23.

Tabela 22 - Análise de variância ANOVA para médias da Emissão Média

| Fonte | DF | SeqSS | AdjSS | AdjMS | F | P | Contribuição |
|---------------|-----------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|---------------------|
| f(mm/rev) | 2 | 0,000002 | 0,000002 | 0,000001 | 7,19 | 0,122 | 67% |
| Vc(m/min) | 2 | 0,000000 | 0,000000 | 0,000000 | 0,39 | 0,721 | 0% |
| ap(mm) | 2 | 0,000001 | 0,000001 | 0,000000 | 3,67 | 0,214 | 33% |
| Erro Residual | 2 | 0,000000 | 0,000000 | 0,000000 | | | |
| Total | 8 | 0,000003 | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Tabela 23 - Análise de variância ANOVA para S/N da Emissão Média

| Fonte | DF | SeqSS | AdjSS | AdjMS | F | P | Contribuição |
|---------------|-----------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|---------------------|
| f(mm/rev) | 2 | 0,52837 | 0,52837 | 0,264190 | 7,45 | 0,118 | 58,57% |
| Vc(m/min) | 2 | 0,02632 | 0,02632 | 0,013160 | 0,37 | 0,729 | 2,57% |
| ap(mm) | 2 | 0,27643 | 0,27643 | 0,138210 | 3,9 | 0,204 | 30,64% |
| Erro Residual | 2 | 0,07088 | 0,07088 | 0,035440 | | | |
| Total | 8 | 0,90200 | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Verifica-se que nenhum parâmetro de corte foi estatisticamente significativo para emissão acústica média, porém aplicando o teste de Tukey verifica-se que para os parâmetros de avanço e profundidade de corte há diferenças significativas entre os níveis. Para o avanço entre 0,15 mm/rev com 0,10 mm/rev e 0,20 mm/rev, sendo a melhor condição 0,20 mm/rev. Para profundidade de corte entre 0,25 mm com 0,75 mm sendo melhor condição 0,25 mm. Esses dados podem ser verificados na tabela 24.

Tabela 24 - Teste de Tukey para os fatores com relação a variável resposta vibração máxima.

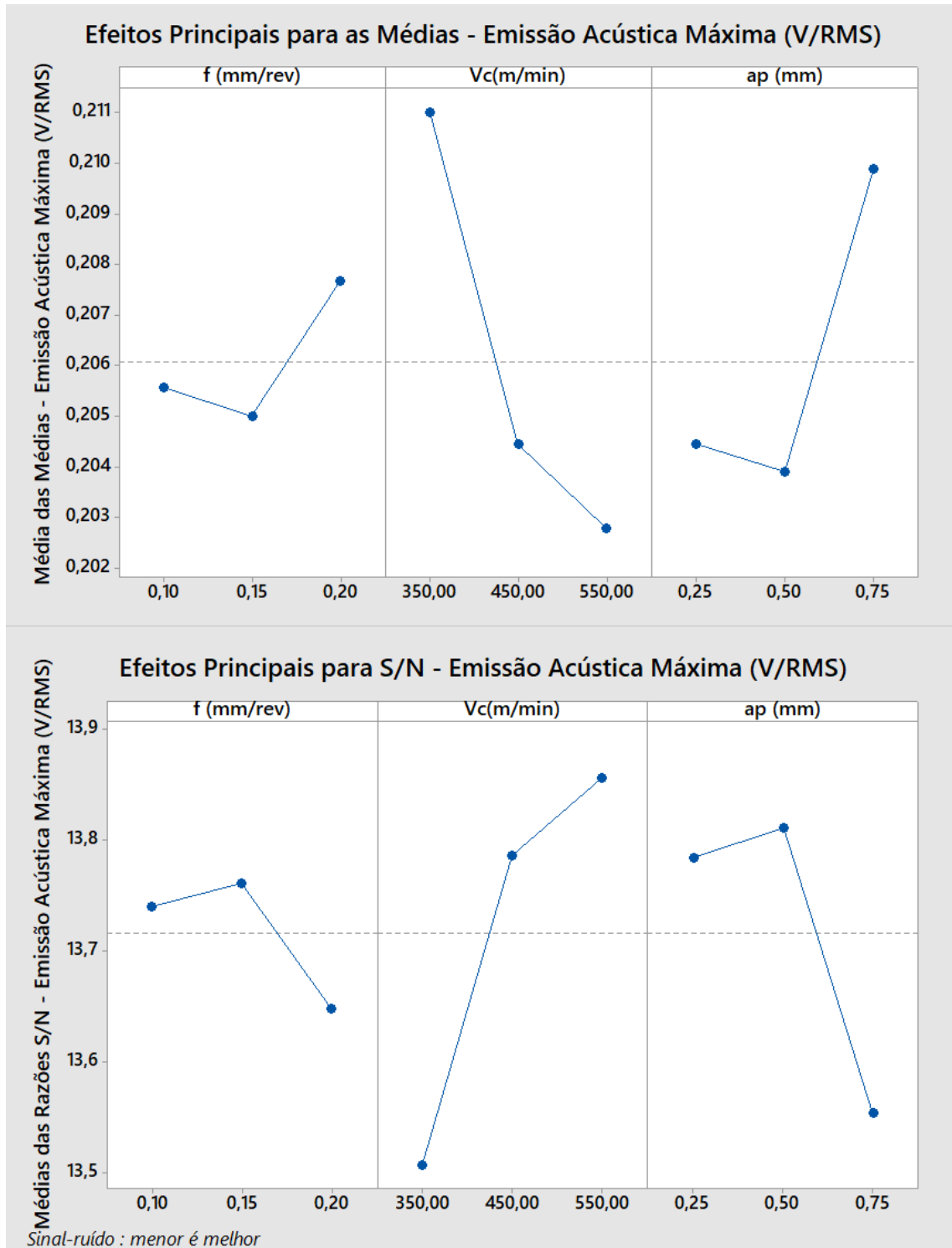
| Fator | Nível | Grupo |
|------------------------------|--------------|--------------|
| Velocidade de corte | 350 | A |
| | 450 | AB |
| | 550 | B |
| Avanço | 0,1 | A |
| | 0,15 | A |
| | 0,2 | A |
| | 0,25 | B |
| Profundidade de Corte | 0,5 | AB |
| | 0,75 | A |

Fonte: elaborado pelo próprio autor (2024)

4.1.8 Emissão acústica máxima

A emissão acústica máxima foi submetida à análise em relação aos efeitos principais das médias e S/N, conforme apresentado na Figura 25 e apresentou a linha centro do gráfico das médias em 0,0206 V/RMS. A melhor condição menor é melhor foram para os valores de V_c de 550m/min , f de 0,15 mm/volta e a_p de 0,5 mm são os fatores que minimizam a potência máxima de corte.

Figura 25 - Análise dos efeitos principais para as média e sinal ruído para emissão acústica máxima.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Foi realizada a ANOVA para média e S/N, para analisar quais fatores influenciaram significativamente a variável emissão acústica máxima, conforme pode ser visto nas tabelas 25 e 26.

Tabela 25 - Análise de variância ANOVA para média da emissão acústica máxima.

| Fonte | DF | SeqSS | AdjSS | AdjMS | F | P | Contribuição |
|---------------|----|----------|----------|----------|------|-------|--------------|
| f(mm/rev) | 2 | 0,000012 | 0,000012 | 0,000006 | 0,22 | 0,823 | 4,88% |
| Vc(m/min) | 2 | 0,000113 | 0,000113 | 0,000057 | 2,05 | 0,328 | 45,93% |
| ap(mm) | 2 | 0,000066 | 0,000066 | 0,000033 | 1,19 | 0,456 | 26,83% |
| Erro Residual | 2 | 0,000055 | 0,000055 | 0,000028 | | | |
| Total | 8 | 0,000246 | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Tabela 26 - Análise de variância ANOVA para S/N da emissão acústica máxima.

| Fonte | DF | SeqSS | AdjSS | AdjMS | F | P | Contribuição |
|---------------|----|---------|---------|---------|------|-------|--------------|
| f(mm/rev) | 2 | 0,0217 | 0,0217 | 0,01085 | 0,21 | 0,826 | 4,82% |
| Vc(m/min) | 2 | 0,20543 | 0,20543 | 0,10271 | 2,00 | 0,333 | 45,67% |
| ap(mm) | 2 | 0,11985 | 0,11985 | 0,05993 | 1,17 | 0,462 | 26,64% |
| Erro Residual | 2 | 0,10278 | 0,10278 | 0,05139 | | | |
| Total | 8 | 0,44976 | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Verifica-se através da análise de variância que nenhum dos fatores foram estatisticamente significativos para emissão acústica máxima.

4.1.9 Resumo dos resultados estatísticos

Na tabela 27 são apresentados os resultados das melhores condições de usinagem para cada variável resposta. No caso para todas as variáveis a melhor condição é a menor.

Verificou-se que para a maioria das variáveis de resposta, exceto rugosidade R_a , as melhores condições estão relacionadas com as maiores velocidades de corte, corroborando com os dados observados na literatura de que, em condições de maiores velocidades de corte, as ferramentas cerâmicas à base de alumina têm mostrado melhor desempenho, além de qualidade de processo superior, tanto para qualidade superficial da peça quanto para menores

desgastes da ferramenta. Houve tendência de melhor desempenho também em avanços menores.

Tabela 27 – Melhores condições para cada variável.

| Variáveis | f(mm/rev) | Vc(m/min) | ap(mm) |
|--|------------------|------------------|---------------|
| Rugosidade R_a | 0,15 | 450 | 0,75 |
| Rugosidade R_t | 0,1 | 550 | 0,25 |
| Desgaste de Flanco V_b | 0,15 | 550 | 0,75 |
| Potência Média | 0,1 | 550 | 0,25 |
| Potência Máxima | 0,1 | 550 | 0,25 |
| Vibração Média | 0,1 | 550 | 0,25 |
| Vibração Máxima | 0,1 | 550 | 0,25 |
| Emissão Acústica Média | 0,2 | 550 | 0,25 |
| Emissão Acústica Máxima | 0,15 | 550 | 0,5 |

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

4.2 DESGASTES NA FERRAMENTA DE CORTE

Os mecanismos de desgaste foram analisados através do Sistema de medição Mitutoyo Quick Scope QS-LZB serie. 359.

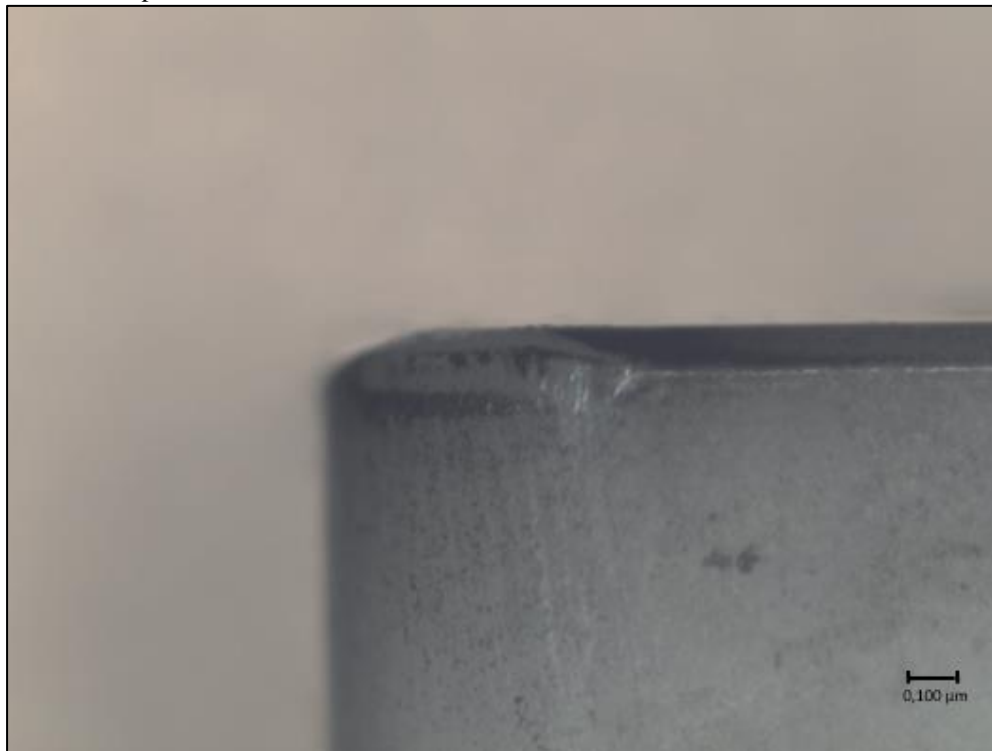
Observou-se, na maioria dos ensaios, a predominância do mecanismo de desgaste abrasivo e o início de formação de entalhe, sendo mais severo em algumas configurações de parâmetros de usinagem.

A condição com menor desgaste de flanco foi a da combinação de avanço de 0,15 mm/rev, velocidade de corte de 550 m/min e profundidade de corte de 0,25 mm, com V_b de 0,083 mm, como pode ser observado na figura 42.

A condição com maior desgaste de flanco foi de avanço de 0,10 mm/rev, velocidade de corte de 450 m/min e profundidade de corte de 0,05mm, com V_b de 0,129 mm, como pode ser observado na figura 43.

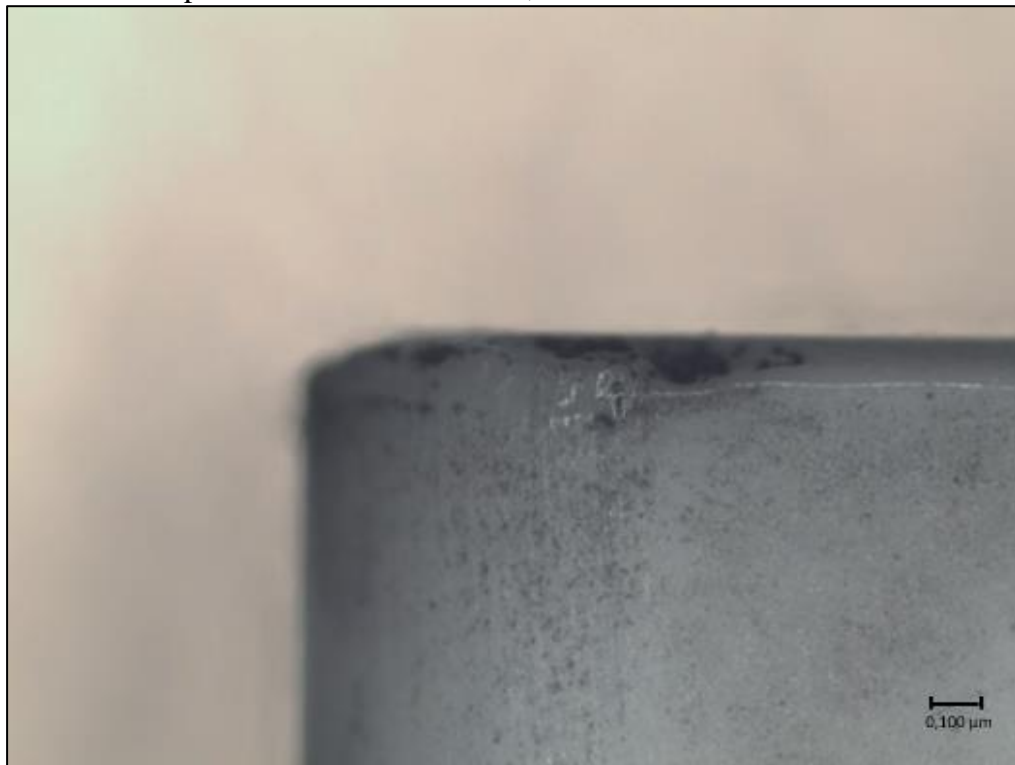
Em um dos ensaios ocorreu lascamento em uma área da ferramenta, sendo os parâmetros dessa condição o avanço de 0,10 mm/rev, velocidade de corte de 450 mm/s e profundidade de corte de 0,75 mm, não ocorrendo nas réplicas dela. Isso pode ser explicado por possíveis pontos de concentração no material da ferramenta que surgem no processo do material. Essa situação pode ser observada na figura 44.

Figura 26 - Desgaste de flanco na condição de avanço de 0,15 mm/rot, velocidade de corte de 550 m/min e profundidade de corte de 0,25mm em ferramenta de corte cerâmica.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Figura 27 – Desgaste de flanco na condição de avanço de 0,10 mm/rev, velocidade de corte de 450 m/min e profundidade de corte de 0,05mm em ferramenta de corte cerâmica.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

Figura 28 – Lascamento em área de ferramenta cerâmica em ensaio na condição avanço de 0,10mm/rev, velocidade de corte de 450 mm/min e profundidade de corte de 0,75mm.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024)

A literatura demonstra que o principal desgaste observado nas ferramentas cerâmicas a base de alumina utilizada em ferros fundidos sendo o desgaste de flanco com mecanismo de desgaste abrasivo, sendo verificado melhor desempenho em velocidade mais altas, como visto na análise estatística anterior e na análise das imagens. Isso pode ser explicado primeiramente pela característica da ferramenta cerâmica de ser um material de melhor desempenho em maiores velocidades, devido principalmente a sua alta dureza à quente e também pelo fato do calor gerado na interface entre ferramenta e peça devido a maior velocidade de corte, tornar o material da peça menos resistência facilitando assim o processo de remoção de material, além do efeito da grafita do ferro fundido que em altas temperaturas atua como lubrificante atenuando o desgaste da ferramenta (Souza, 2017; Sousa, 2020). Além disso, o ferro fundido nodular devido sua composição é abrasivo e pode gradualmente desgastar a superfície da ferramenta de corte, sendo assim principal mecanismo verificado.

Pode-se verificar a formação do desgaste de entalhe pelas imagens das arestas de corte. Uma possível explicação para isso é que, durante o torneamento do ferro fundido nodular, pode ocorrer a liberação de partículas endurecidas pelo processo de oxidação do material da peça, que causam e acentuam esse desgaste na ferramenta.

Outro ponto importante quanto aos desgastes encontrados é a baixa incidência do desgaste de cratera. O principal mecanismo do desgaste de cratera é a difusão e, sendo a

alumina um material com inércia e estabilidade química, o desgaste por difusão é dificultada. Como os cavacos resultantes da usinagem de ferro fundido nodular são do tipo fragmentado, a craterização da superfície de saída também é dificultada.

Verificou-se então menores desgastes para esse tipo a ferramenta de óxido de alumínio dopada com óxido de magnésio em situações de maiores velocidade de corte na usinagem do ferro fundido nodular. Esse é um ponto vantajoso no cenário industrial, principalmente pela necessidade de maior produtividade do processo juntamente com economia, pois quanto maior a vida da ferramenta menor necessidade de trocas, logo menos custos.

5. CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi realizado uma análise de desempenho de ferramenta cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ aplicada no torneamento do ferro fundido nodular. Para o desenvolvimento do trabalho foi crucial a aplicação do método de Taguchi, que possibilitou verificar a influência dos parâmetros de corte nas principais variáveis de resposta e analisar em quais condições se obteve maior robustez do processo, condições de menor variabilidade do processo.

Quanto a rugosidade R_a e R_t , indicativos da qualidade superficial da peça, as melhores condições foram para R_a , V_c de 350 m/min, a_p de 0,75mm e f de 0,15mm/volta. Já para R_t , os melhores valores foram obtidos para V_c de 550 m/min, a_p de 0,25 mm e f de 0,1 mm/volta. Realizando o teste de tukey verificou-se que existe diferença significativa para f nos níveis 0,15 e 0,20, sendo o nível 0,15 mm/rot aquele que oferece menor valor de rugosidade R_a . Para R_t diferença significativa para f nos níveis 0,10 e 0,20, sendo o nível 0,10 mm/rot aquele que oferece menor valor de R_t .

Quanto ao desgaste de flanco V_b a melhor condição, visando menores valores de desgaste, foi em V_c de 500 m/min, a_p de 0,75 mm e f de 0,15mm/rot. Realizando o teste de Tukey, verifica-se que existe diferença significativa em alguns níveis de velocidade de corte e avanço. Para velocidade de corte ocorreu diferença significativa entre os níveis 350 m/min e 450 m/min com 550 m/min, sendo os melhores resultados para o nível de 550 m/min. Para o avanço verifica-se diferença significativa entre o nível 0,10 mm/rot e 0,15mm/rot, sendo melhor resultado para 0,15 mm/rot.

Quanto a potência foram analisados tanto resultados para potência média de corte, quanto para potência máxima de corte. A melhor condição para ambas foi de V_c de 550 m/min, f de 0,1 mm/volta e a_p de 0,25mm. Nesse caso específico se obtém o melhor resultado para a potência no menor nível de profundidade de corte de 0,25 mm.

Quanto a vibração foram analisados os resultados relativos a vibração média e máxima, em ambos os melhores resultados, associados aos menores valores de vibração foram V_c de 550 m/min, f de 0,20 mm/rev e a_p de 0,25mm. Realizando o teste de Tukey observou-se diferenças significativas para os níveis dos parâmetros de profundidade de corte e velocidade de corte. Sendo para vibração média diferença significativa para a_p nos níveis de 0,25 mm e 0,50 mm com 0,75 mm, sendo 0,25 melhor condição e para velocidade de corte diferença significativa entre os níveis 350 m/min e 550 m/min, sendo a melhor condição em 550 m/min. Para vibração média para a_p teve diferença significativa nos níveis de 0,25 mm

e 0,75, sendo melhor condição de 0,25 e para velocidade de corte entre 350 m/min e 550 m/min, sendo a melhor condição em 550 m/min.

Quanto a emissão acústica foram analisadas emissão acústica média e emissão acústica máxima. A melhor condição para emissão acústica média foi de V_c de 550 m/min, f de 0,20 mm/rev e a_p de 0,25 mm, e para emissão acústica máxima V_c de 550 m/min, f de 0,15 mm/rev e a_p de 0,50 mm. Para emissão acústica média verificou-se aplicando o teste de Tukey diferença significativa entre os níveis de avanço e profundidade de corte. Sendo para avanço diferença entre os níveis de 0,10 mm/rev e 0,20 mm/rev com 0,15 mm/rev, sendo a melhor condição de 0,15 mm/rev. E para profundidade de corte verificou-se diferença significativa entre os níveis de 0,25 mm com 0,75 mm, sendo 0,25 a melhor condição.

Quanto aos desgastes analisados verificou-se a presença principalmente do mecanismo de desgaste abrasivo e em alguns casos o início da formação do entalhe. Sendo o desgaste predominantemente de flanco. O desgaste de cratera não é expresso na ferramenta principalmente devido sua característica de inércia química. A melhor condição com menor desgaste de flanco foi nas seguintes condições de parâmetros de corte V_c de 550 m/min, a_p de 0,25 mm e f de 0,15 mm/rev, com V_b de 0,083 mm. A pior condição com maior desgaste de flanco foram em 0,10 mm/rev, velocidade de corte de 450 m/min e profundidade de corte de 0,05 mm, com V_b de 0,129 mm

Em suma, a ferramenta cerâmica de alumina dopada com óxido de magnésio apresentou bons resultados relacionados a qualidade superficial e desgaste de ferramenta dentro dos níveis de parâmetros de corte aplicados. Sendo um ponto de destaque o seu maior desempenho em velocidades de corte maiores, sendo a condição de maior nível presente na maioria das melhores condições para os as variáveis avaliadas. Isso pode ser explicado tanto pelas características e propriedades inerentes da ferramenta de corte utilizada e pela própria peça em altas temperaturas providenciar uma condição de processo que melhora a qualidade dele. Isso em sentido industrial é muito vantajoso, pois quanto maior velocidade de corte aplicada, maior a produtividade, além também do ponto de que não é utilizado fluido de corte, que proporciona diminuição dos custos e maior sustentabilidade do processo como um todo. Todos esses fatores apontam que os pesquisas e desenvolvimento das ferramentas cerâmicas a base de alumina na aplicação no torneamento dos ferros fundidos são válidas e podem trazer diversas vantagens no cenário industrial.

Para futuros trabalhos é possível realização de testes de usinagem em outros níveis, verificando o desempenho da ferramenta em velocidade de cortes mais altas. Realização de trabalho comparativo com outros tipos de ferramenta de corte como as de metal duro. Realização de trabalho comparativo com aplicação de outros dopantes na ferramenta de corte à base de alumina. Realização de trabalho comparativo com outros teor de dopante de óxido de magnésio na ferramenta cerâmica à base de alumina. Realização de investigação das causas potenciais levantadas nesse trabalho.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, S. Optimizing machining parameters to combine high productivity with high surface integrity in grinding silicon carbide ceramics. **Ceramics international**, Oxford , v. 42, n. 5, p. 6244–6262, april , 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0272884216000365>. Acesso em: 20 jun . 2023.

ALVES, M. C. S. **Análise do processo de torneamento do aço AISI 4340 temperado e revenido através de ferramentas cerâmicas de Al₂O₃+MgO experimentais**. Tese (Livre-Docente em Usinagem dos Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/f59e7e2d-1106-432c-a722-682fcec56f1f/content>. Acesso em: 10 mar.2023.

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

BINDER, M.; KLOCKE, F.; LUNG, D. Tool wear simulation of complex shaped coated cutting tools. **Wear**, Lausanne, v. 330-331, p. 600-607, may. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164815000228> . Acesso em: 10 mar. 2023.

BOBZIN, K. High-performance coatings for cutting tools. **Cirp journal of manufacturing science and technology**, Dublin , v. 18, p. 1–9, aug , 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1755581716300827> . Acesso em: 15 jul.2023.

CALLISAYA, E. S. **Machinability analysis of VAT 32®nickel based superalloy using commercial and experimental milling inserts**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, p.88. 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/15c89f7d-ab23-4143-b196-adb1a2316dc6>. Acesso em: 10 mar.2023.

CALLISTER JR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma Introdução**. 7ª ed. New York : McGrall-Hill, 2006.

CAMUŞCU, N. Effect of cutting speed on the performance of Al₂O₃ based ceramic tools in turning nodular cast iron. **Materials & design**, Amsterdam v. 27, n. 10, p. 997–1006, jan. 2006. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306905000555> . Acesso em: 12 fev.2023.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamento térmico, principais tipos**. 7. ed. ampl. e rev. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2005.

DA, O.; SIDNEI, P. Automatic classification of graphite in cast iron. **Microscopy and microanalysis**, New York , v. 11, n. 4, p. 363–371, 7 jul. 2005. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/7681043_Automatic_Classification_of_Graphite_in_Cast_Iron . Acesso em: 12 fev.2023.

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

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**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, p.162. 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/0c2ca53a-e84f-4a87-95de-24f584f1a477> . Acesso em: 15 mar. 2023.

FRANÇA, E. O. **Usinagem do ferro fundido vermicular com ferramenta de metal duro e cerâmicas de Al₂O₃ + Cr₂O₃ e Al₂O₃ + MgO**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, p.116. 2020. Disponível em:

<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/741601e2-5f29-4f85-89e1-ef684f88d5ef/content>. Acesso em: 14 mar.2023.

GOINDI, G.S.; SARKAR, P. Dry machining: a step towards sustainable machining – challenges and future directions. **Journal of cleaner production**, Amsterdam , v. 165, p. 1557–1571, 1 nov. 2017. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/318775917_Dry_Machining_A_Step_towards_Sustainable_Machining_-_Challenges_and_Future_Directions . Acesso em: 23 mar. 2023.

GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009. 336p.

KALPAKJIAN, S. **Manufacturing engineering and technology**. 3.ed. Nova York: Addison-Wesley Publishing Co., 1995.

KONDO, M . Y. **Análise do processo de torneamento da superliga Vat 32® com ferramentas de corte experimentais e comerciais**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, p.211. 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/d16afdd8-b2a6-43a7-8d41-2ea73366d20b/full>. Acesso em: 17 mar.2023.

KOPYCIŃSKI, D. *et al.* Preparation vermicular graphite in thin and thick wall iron castings. **Archives of foundry engineering**, Katowice , v. 12, n. 2, p. 41–44, 2012. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/268204843_A_R_C_H_I_V_E_S_of_82_Preparation_Vermicular_Graphite_in_Thin_and_Thick_Wall_Iron_Castings . Acesso em: 15 jun.2023.

LI, X. A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning. **International journal of machine tools and manufacture**, Inglaterra, v. 42, n. 1, p. 157-165, 2002. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695501001080> . Acesso em: 21 mar.2023.

MACHADO, A. R. *et al.* **Teoria da usinagem dos metais**. 3. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2015. 408 p.

MUÑOZ, R.; DINIZ, A.E . Effect of the gray cast iron microstructure on milling tool life and cutting force. **Journal of the brazilian society of mechanical sciences and engineering**, Rio de Janeiro, v. 35, n. 1, p. 17–29, mar.2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257810835_Effect_of_the_gray_cast_iron_microstructure_on_milling_tool_life_and_cutting_force . Acesso em: 13 fev.2023.

NGQASE, M.; PAN, X. An overview on types of white cast irons and high chromium white cast irons. **Journal of physics: conference series**, New York, v. 1495, p. 12-23, mar, 2020. Disponível em:https://www.researchgate.net/publication/342126437_An_Overview_on_Types_of_White_Cast_Irons_and_High_Chromium_White_Cast_Irons . Acesso em: 16 jun. 2023.

PÁLMAI, Z. Proposal for a new theoretical model of the cutting tool' s flank wear. **Wear**, Lausanne, v. 303, n. 1–2, p. 437–445, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164813002147> . Acesso em: 20 jul.2023.

PINHEIRO, C. **Avaliação da usinagem do Inconel 718 via metodologia de taguchi**.Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá , p.206. 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/bf37a9fb-e1bb-4ad5-8238-9f2af8873c1d> . Acesso em: 14 fev.2023.

PIMENOV, D. Y. *et al.* Resource saving by optimization and machining environments for sustainable manufacturing: a review and future prospects. **Renewable and sustainable energy reviews**, Amsterdam , v. 166, p 1-25 ,sep.2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032122005524> . Acesso em: 12 mar. 2023.

QEHAJA, N. *et al.* Effect of machining parameters and machining time on surface roughness in dry turning process. **Procedia engineering**, Amsterdam , v. 100, p. 135–140, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/272890214_Effect_of_Machining_Parameters_an

d_Machining_Time_on_Surface_Roughness_in_Dry_Turning_Process . Acesso em: 12 jun.2023.

REN, Z. *et al.* On the mechanical properties and thermal conductivity of compacted graphite cast iron with different pearlite contents. **Journal of materials engineering and performance**, Ohio , v.32 , p. 9968-9976, jan.2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-023-07823-7> . Acesso em: 17 fev. 2023.

RAMESH, K. *et al.* Optimization of turning process parameters in machining of heat treated ductile iron bar using Taguchi technique. **Materials today: proceedings**, Cleveland , v. 22, p. 2316–2323, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320321337> . Acesso em : 5 mar. 2023.

ROY, R. K. **Design of experiments using the taguchi approach: 16 steps to product and process improvement.** New York: Wiley, 2001.

ŞAHINOĞLU, A.; RAFIGHI, M. Optimization of cutting parameters with respect to roughness for machining of hardened AISI 1040 steel. **Materials testing**, Berlin, v. 62, n. 1, p. 85, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338503765_Optimization_of_cutting_parameters_with_respect_to_roughness_for_machining_of_hardened_AISI_1040_steel . Acesso em : 14 jun.2023.

SIDDHPURA, M.; PAUROBALLY, R. A review of chatter vibration research in turning. **International journal of machine tools and manufacture**, Amsterdam, v. 61, p. 27–47, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695512000831> . Acesso em: 10 jul.2023.

SILVA, M. B. **Design of experiments: applications.** Rijeka, Croatia: InTech, 2013.

SINGH, J. *et al.* State of the art review on the sustainable dry machining of advanced materials for multifaceted engineering applications: progressive advancements and

directions for future prospects. **Materials research express**, Bristol , v.9 , p 1-25, 13 maio , 2022. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/360579712_State_of_the_art_review_on_the_sustainable_dry_machining_of_advanced_materials_for_multifaceted_engineering_applications_Progressive_advancements_and_directions_for_future_prospects . Acesso em: 04 fev.2023.

SONG, D. *et al.* Development of high-performance enamel coating on grey iron by low-temperature sintering. **Materials**, Basel v. 11, n. 11, p. 2183, 4 nov. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328753948_Development_of_High-Performance_Enamel_Coating_on_Grey_Iron_by_Low-Temperature_Sintering . Acesso em: 12 jun.2023.

SOORI, M.; ASMAEL, M. A review of the recent development in machining parameter optimization. **Jordan journal of mechanical and industrial engineering**, Zarqa , v. 16, n. 2, p. 205–223, 2022. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/357866324_A_Review_of_the_Recent_Development_in_Machining_Parameter_Optimization . Acesso em : 10 fev.2023.

SOUSA, J *et al* . A review on the machining of cast irons. **The international journal of advanced manufacturing technology**, London , v. 94, n. 9-12, p. 4073–4092, sep. 2017. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/320120202_A_review_on_the_machining_of_cast_irons . Acesso em : 13 mar. 2023.

SOUSA, T.A. **Usinagem de ferro fundido vermicular com ferramenta de corte à base de alumina magnésio**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá , p.143. 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/412cdb43-31b2-41a7-a331-261b6231bde7> . Aceso em: 23 mar.2023.

SOUZA, A. J. **Aplicação de multi-sensores no prognóstico da vida da ferramenta de corte em torneamento**. Tese (Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de

Santa Catarina, Florianópolis, p.226.2004. Disponível em:
<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/88055> . Acesso em: 17 jun.2023.

SOUZA, J. V. C *et al.* Cutting forces in turning of gray cast iron using silicon nitride based cutting tool. **Materials & design**. Amsterdam, v. 30, p. 2715-2720, 2009. Disponível em :
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306908004986> . Acesso em :
14. fev.2023.

SOUZA, L. F. **Usinagem do ferro fundido nodular com ferramenta cerâmica a base de alumina desenvolvida em laboratório**. Dissertação (Mestrado em Materiais) - Faculdade de Engenharia, UNIFOA, Volta Redonda, 2013. Disponível em:
<https://revistas.unifoa.edu.br/cadernos/article/view/2102> . Acesso em: 18 mar. 2023.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte**. 4 ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995. 249 p.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4. ed. Boston: Butterworth- Heinemann, 2000. 446 p.

TWARDOWSKI, P. *et al.* Identification of tool wear using acoustic emission signal and machine learning methods. **Precision engineering**, New York , v. 72, p. 738–744, nov. 2021. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635921001884> . Acesso em: 16 jun.2023.

UPADHYAY, S.; SAXENA, K. K. Effect of Cu and Mo addition on mechanical properties and microstructure of grey cast iron: an overview. **Materials today: Proceedings**, Cleveland, v.26 , p. 2462-2470 , mar. 2020. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320312797> . Acesso em :
17 fev.2023.