



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE PARA O PROCESSO
DE FRESAMENTO FRONTAL DE ACABAMENTO DO AÇO SAE 4140
SOB CONDIÇÕES DE CORTE A SECO E MQF, UTILIZANDO O
PROJETO DE EXPERIMENTOS *BOX-BEHNKEN* DESIGN**

TIAGO MATEUS BEHRENDSEN

Lajeado/RS, novembro de 2023

TIAGO MATEUS BEHRENDSEN

**OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE PARA O PROCESSO
DE FRESAMENTO FRONTAL DE ACABAMENTO DO AÇO SAE 4140
SOB CONDIÇÕES DE CORTE A SECO E MQF, UTILIZANDO O
PROJETO DE EXPERIMENTOS *BOX-BEHNKEN* DESIGN**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Mecânica, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. William Hackenhaar.

Lajeado/RS, novembro de 2023

TIAGO MATEUS BEHRENDSEN

**OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE PARA O PROCESSO
DE FRESAMENTO FRONTAL DE ACABAMENTO DO AÇO SAE 4140
SOB CONDIÇÕES DE CORTE A SECO E MQF, UTILIZANDO O
PROJETO DE EXPERIMENTOS *BOX-BEHNKEN* DESIGN**

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na Disciplina de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica:

Prof. Dr. William Hackenhaar - Orientador
UNIVATES

Prof. Me. Rafael Farias Garcia
UNIVATES

Prof. Júlio Damyan Imbriaco Silveira
UNIVATES

Lajeado/RS, novembro de 2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela vida, por me dar forças para viver e por estar sempre comigo.

Agradeço profundamente à minha família pela paciência e apoio incondicional ao longo desta jornada. Vocês foram minha fonte de inspiração e suporte, proporcionando a base emocional necessária para enfrentar os desafios e celebrar as conquistas

Agradeço ao Professor Dr. William Hackenhaar pela orientação valiosa, paciência e sabedoria compartilhada durante todo o processo de pesquisa. Suas ideias foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Um agradecimento especial aos colegas do curso de Engenharia Mecânica. O intercâmbio de ideias e debates ao longo dos anos contribuíram significativamente para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Agradeço à equipe da JA Industrial pela oportunidade de realizar os experimentos necessários para este trabalho em suas instalações. A colaboração e suporte oferecidos foram cruciais para a aplicação prática dos conceitos estudados.

Agradeço também a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução deste trabalho.

RESUMO

Grande parte dos produtos manufaturados na indústria utilizam como meio de produção a usinagem, tornando-a altamente relevante no cenário industrial mundial. Um segmento altamente utilizado é o da usinagem seriada, que é a aplicação em grandes volumes de peças. Este método de produção é relevante pois possibilita a produção rápida e com baixos custos devido ao constante fluxo de componentes. Em um cenário de grande competitividade entre empresas, busca-se a melhoria nos processos a fim de aumentar a produtividade e eliminar desperdícios. Em geral, nos processos de usinagem se busca utilizar ferramentas de alto desempenho aplicadas para cada processo. Devido ao fato de que há uma grande gama de operações, materiais e ferramentas disponíveis, torna-se um desafio equacionar todas estas variáveis. Neste cenário, a lubrificação empregada nos processos de usinagem pode ser altamente relevante para a qualidade do componente fabricado e custos do processo. A lubrificação por mínima quantidade de fluido (MQF) aparece como uma possibilidade para aumentar a eficiência da usinagem de materiais metálicos. O presente trabalho busca aplicar um processo de fresamento de face variando parâmetros do processo e ferramentas de corte para determinar a combinação ótima deste processo. Para o planejamento e execução dos ensaios, se utilizou a metodologia de planejamento de experimentos Box-Behnken Design. A partir dos experimentos foram avaliadas a texturada da superfície usinada das amostras após a usinagem, a morfologia dos cavacos gerados e o desgaste das ferramentas de corte. A partir dos resultados foi verificado que a utilização da técnica de MQL tem influência positiva na redução da rugosidade, e desgaste de insertos.

Palavras-chave: usinagem a seco; fresamento frontal; lubrificação; MQF; Box-Behnken.

ABSTRACT

Most of the products manufactured in the industry use machining as a means of production, making it highly relevant in the world industrial scenario. A highly used segment is serial machining, which is the application in large volumes of parts. This production method is relevant because it enables fast production and low costs due to the constant flow of components. In a scenario of great competitiveness between companies, it is sought to improve processes to increase productivity and eliminate waste. In general, machining processes seek to use high-performance tools applied to each process. Since there is a wide range of operations, materials, and tools available, it becomes a challenge to equate all these variables. In this scenario, the lubrication employed in machining processes can be highly relevant to the quality of the manufactured component and process costs. Minimum fluid lubrication (MQF) has been shown to be an alternative to increase the efficiency of machining metallic materials. The present work seeks to apply a face milling process by varying process parameters and cutting tools to determine the optimal combination of this process. For the planning and execution of the tests, the Box-Behnken Design experiment planning methodology was used. From the experiments, the surface finish of the samples after machining, the morphology of the chips generated, and the wear of the cutting tools were evaluated. From the results it was verified that the use of the MQL technique has a positive influence on reducing roughness and uncertain wear.

Keywords: dry machining; face milling; lubrication; MQF; Box-Behnken.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Efeito do encruamento por trefilação a frio na vida da ferramenta | 22 |
| Figura 2 – Fresamento com fluido abundante | 24 |
| Figura 3 – Fresamento utilização do processo MQF..... | 28 |
| Figura 4 – Custos relacionados a utilização de fluidos de corte em abundância..... | 29 |
| Figura 5 – Fresamento de face | 30 |
| Figura 6 – Cabeçote intercambiável..... | 31 |
| Figura 7 – Tipos de fresamento frontal..... | 31 |
| Figura 8 – Fresamento discordante | 32 |
| Figura 9 – Fresamento concordante..... | 32 |
| Figura 10 – Formas de desgaste..... | 34 |
| Figura 11 – Desgaste de flanco..... | 34 |
| Figura 12 – Desgaste de entalhe | 35 |
| Figura 13 – Desgaste de cratera | 35 |
| Figura 14 – Deformação plástica..... | 36 |
| Figura 15 – Lascamento e quebra..... | 35 |
| Figura 16 – Trincas na ferramenta | 37 |
| Figura 17 – Medição do desgaste | 38 |
| Figura 18 – Movimentos de corte | 40 |
| Figura 19 – Penetração da ferramenta..... | 42 |
| Figura 20 – Forças de corte | 43 |
| Figura 21 – Elementos que representam o acabamento..... | 44 |

| | |
|--|----|
| Figura 22 – Parâmetros de rugosidade | 46 |
| Figura 23 – Superfícies geometricamente diferentes com mesmo valor de Ra | 46 |
| Figura 24 – Principais formas do cavaco..... | 48 |
| Figura 25 – Deslocamento de material da aresta postiça | 49 |
| Figura 26 – Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos | 49 |
| Figura 27 – Cubo de Delineamento Experimento Box-Behnken | 51 |
| Figura 28 – Gráfico de Pareto | 53 |
| Figura 29 – Fluxograma do procedimento metodológico | 55 |
| Figura 30 – Espectrômetro Shimadzu PDA-7000..... | 56 |
| Figura 31 – Corpo de prova pré-usinado..... | 57 |
| Figura 32 – Fixação do corpo de prova..... | 57 |
| Figura 33 – Durômetro Mitutoyo Durotwin..... | 58 |
| Figura 34 – Centro de usinagem Akira Seiki modelo Sr3 Xp | 58 |
| Figura 35 – Caminho da ferramenta de corte..... | 59 |
| Figura 36 – Cabeçote tipo APMT 11 (d20x150l) - Ws..... | 59 |
| Figura 37 –Caracterização do inserto | 60 |
| Figura 38 – Verificação do batimento radial da ferramenta de corte | 60 |
| Figura 39 – Verificação do raio da ponta da ferramenta de corte..... | 61 |
| Figura 40 – Óleo Quimatic Jet..... | 61 |
| Figura 41 – Aplicação de lubrificação por spray (MQF) | 62 |
| Figura 42 – Desenho esquemático do sistema de lubrificação por MQF utilizado | 62 |
| Figura 43 – Rugosímetro Mitutoyo modelo SurfTest SJ 301 | 63 |
| Figura 44 – Microscópio digital..... | 64 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 – Gráfico comparativo dos resultados de medição de rugosidade | 69 |
| Gráfico 2 – Gráfico de contorno de Ra seco versus V_c ; F_z | 74 |
| Gráfico 3 – Gráfico de contorno de Ra seco versus V_c ; A_p | 74 |
| Gráfico 4 – Gráfico de contorno de MQF seco versus V_c ; F_z | 75 |
| Gráfico 5 – Gráfico de contorno de Ra MQF versus V_c ; A_p | 76 |
| Gráfico 6 – Gráfico de Pareto da relevância dos fatores no estudo com MQF..... | 76 |
| Gráfico 7 – Gráfico de Pareto da relevância dos fatores no estudo a seco..... | 77 |
| Gráfico 8 – Gráficos de otimização | 79 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 – Perfis de rugosidade e superfície usinada da amostra com menor rugosidade encontrada..... | 70 |
| Quadro 2 – Perfis de rugosidade e superfície usinada da amostra com maior rugosidade encontrada..... | 71 |
| Quadro 3 – Cavacos com melhor morfologia encontrada..... | 81 |
| Quadro 4 – Comparativo entre cavacos com formação alongada..... | 82 |
| Quadro 5 – Imagens insertos | 83 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Composição química do aço SAEI 4140 . | 23 |
| Tabela 2 – Parâmetros de rugosidade | 45 |
| Tabela 3 – Delineamento Experimental Box-Behnken | 51 |
| Tabela 4 – Composição principais elemento químicos do aço SAE 4140. | 56 |
| Tabela 5 – Parâmetros de usinagem | 65 |
| Tabela 6 – Aleatorização BBD criada a partir do Minitab®. | 65 |
| Tabela 7 – Parâmetros de corte utilizados para análise de desgaste de insertos. | 66 |
| Tabela 8 – Resultados dos experimentos em R_a | 68 |
| Tabela 9 – Os três melhores e piores valores de R_a . | 69 |
| Tabela 10 – ANOVA para MQF e a seco | 73 |
| Tabela 11 – Resultado otimização das variáveis de entrada | 78 |
| Tabela 12 – Validação das equações de regressão. | 80 |
| Tabela 13 – Resultados experimentais da amostra 5 | 80 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

| | |
|-----------|---------------------------------------|
| A_p | Profundidade de corte eixo Z |
| Al | Alumínio |
| As | Arsênio |
| Al_3O_3 | Óxido de Alumínio |
| BBD | Box Behnken Design |
| C | Carbono |
| Ca | Cálcio |
| CNC | Comando numérico computadorizado |
| Co | Cobalto |
| Cu | Cobre |
| CR | Corte radial |
| Cr | Cromo |
| CCC | Cúbica de corpo centrado |
| Cermet | Material composto de cerâmica e metal |
| CFC | Cúbico de face centrada |
| fz | Avanço de corte |
| Fe | Ferro |
| F_u | Força de usinagem |
| F_t | Força ativa |
| F_p | Força passiva |
| F_c | Força de corte |
| F_{ap} | Força de apoio |
| HC | Hexagonal compacta |
| HB | Dureza Brinell |

| | |
|----------|--|
| HP | Potência |
| KT | Desgastes de profundidade de cratera |
| KB | Largura da cratera |
| KM | Distância do centro da cratera à aresta de corte |
| L_n | Comprimento de medição |
| Mn | Manganês |
| Mo | Molibdênio |
| ml/h | Mililitros por hora |
| MQF | Mínima quantidade de fluido |
| MPa | Mega pascal |
| Nb | Nióbio |
| Ni | Níquel |
| n | Rotação (Rpm) |
| P | Fósforo |
| PDC | Profundidade de corte |
| R_a | Desvio aritmético médio |
| R_q | Desvio aritmético Médio |
| R_y | Altura total |
| R_{sk} | Fator de assimetria do perfil |
| R_{ku} | Fator de achatamento de perfil |
| S | Enxofre |
| SAE | Society of Automotive Engineers |
| Sb | Antimônio |
| Si | Silício |
| T | Tempo |
| Ti | Titânio |
| V | Vanádio |
| V_c | Velocidade de corte |
| VB | Desgaste De flanco |
| TiCN | Titânio carbono |
| TiAlN | Nitreto de titânio e alumínio |
| W | Tungstênio |
| Zn | Zinco |
| Zr | Zircônio |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 1.1 Tema..... | 15 |
| 1.2 Delimitação do tema..... | 15 |
| 1.3 Problema de pesquisa..... | 16 |
| 1.4 Hipótese..... | 16 |
| 1.6 Objetivo geral..... | 16 |
| 1.7 Objetivos específicos..... | 16 |
| 1.8 Justificativa..... | 17 |
| 2 REVISÃO TEÓRICA..... | 19 |
| 2.1 Usinabilidade dos metais..... | 19 |
| 2.2 Propriedades do aço SAE 4140..... | 22 |
| 2.3 Fluidos Lubrificadores..... | 23 |
| 2.3.1 Classificação dos fluidos de corte..... | 24 |
| 2.3.1.1 Óleos..... | 25 |
| 2.3.1.2 Emulsões..... | 24 |
| 2.3.1.3 Soluções..... | 25 |
| 2.4 Seleção do fluido de corte..... | 26 |
| 2.4.1 Material da ferramenta..... | 26 |
| 2.4.2 Operação e sua severidade..... | 27 |
| 2.5 Usinagem a seco e com mínima quantidade de fluido (MQF)..... | 27 |
| 2.6 Operação de Fresamento..... | 30 |
| 2.7 Desgaste e vida da ferramenta..... | 33 |
| 2.7.1 Medição do desgaste da ferramenta..... | 37 |
| 2.7.2 Mecanismos causadores de desgaste..... | 39 |
| 2.8 Grandezas e movimentos no processo de usinagem..... | 40 |
| 2.8.1 Velocidade de corte (V_c)..... | 41 |
| 2.8.2 Velocidade de avanço (V_f)..... | 41 |
| 2.8.3 Grandezas de penetração..... | 42 |
| 2.8.4 Força e potência de corte..... | 42 |
| 2.9 Superfícies usinadas e rugosidade..... | 44 |
| 2.10 Formação de cavaco..... | 47 |

| | |
|--|------------|
| 2.11 Box-Behnken Design (BBD)..... | 50 |
| 2.12 Análise de Variância (ANOVA)..... | 52 |
| 2.13 Gráfico de Pareto..... | 52 |
| 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS..... | 54 |
| 3.1 Classificação da pesquisa..... | 55 |
| 3.2 Configuração do corpo de prova..... | 55 |
| 3.3 Caracterização da máquina-ferramenta e ferramentas de corte utilizadas.. | 58 |
| 3.4 Lubrificação de corte utilizada..... | 61 |
| 3.5 Medição da rugosidade..... | 63 |
| 3.6 Análise de cavacos..... | 64 |
| 3.7 Planejamento estatístico experimental..... | 64 |
| 3.8 Análise do desgaste das ferramentas..... | 66 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 68 |
| 4.1 Análise da rugosidade..... | 68 |
| 4.2 Análise estatística da rugosidade Ra..... | 73 |
| 4.3 Equação de regressão..... | 78 |
| 4.3.1 Validação do método..... | 80 |
| 4.4 Análise morfológica dos cavacos..... | 81 |
| 4.5 Análise de desgaste dos insertos..... | 83 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 86 |
| 5.1 Sugestões para trabalhos futuros..... | 87 |
| REFERÊNCIAS..... | 89 |
| APÊNDICES..... | 93 |
| ANEXOS..... | 102 |

1 INTRODUÇÃO

Uma área que está a cada dia se aperfeiçoando é a da usinagem. O surgimento de novas tecnologias em questão de máquinas-ferramentas e materiais faz com que cada vez mais deva-se buscar conhecimento nas áreas relativas a este processo. De acordo com Machado *et al.* (2015), um engenheiro responsável pela definição destes processos deve ter amplo conhecimento de todas as variáveis envolvidas, como o tipo de materiais e suas propriedades, tolerâncias, acabamentos superficiais, processos envolvidos, custos de ferramentas, vida de ferramentas, sucata gerada, entre outros fatores que devem ser considerados.

A usinagem, especialmente o fresamento, enfrenta dificuldades para garantir acabamentos de alta qualidade devido à característica intermitente do processo. A intermitência cria variações nas condições de corte, levando a superfícies irregulares. As vibrações indesejadas e o desgaste da ferramenta também afetam negativamente o acabamento. Superar esses desafios requer técnicas avançadas, controle preciso do processo e escolha adequada de ferramentas, visando resultados que atendam às especificações de acabamento desejadas (MACHADO *et al.*, 2015).

Basicamente, usinagem é um processo de fabricação no qual ocorre remoção de material da peça a ser usinada por meio de corte. Para este trabalho, são utilizadas máquinas equipadas com ferramentas de corte que possuem certos ângulos, os quais facilitam sua penetração no material a fim de remover o material excedente respeitando suas características dimensionais. O material que sobra é chamado de cavaco. As máquinas utilizadas neste processo são chamadas máquinas-ferramenta, alguns exemplos dessas máquinas são os tornos, as fresadoras, as plainas e as serras. Estas máquinas utilizam ferramentas de corte que, em sua maioria, são de aço rápido ou de metal duro, e que devem ser adequadamente fixadas para realizar

determinados movimentos de corte. O processo de usinagem também pode ocorrer de forma manual com o auxílio de uma lima, por exemplo, em que todos os movimentos são gerados pelo trabalhador, podendo ser aplicada uma lima rotativa em turbinas pneumáticas ou elétricas, mas nesses casos a precisão da peça dependerá da habilidade do operador (ALMEIDA, 2015).

Aumentar a vida útil das arestas de corte é uma tarefa complexa devido à influência de diversas variáveis no processo. Fatores como o tipo de material a ser cortado, a velocidade de corte e a geometria da peça desempenham papéis cruciais na durabilidade das ferramentas de corte. É nesse cenário que entram em cena os processos de lubrificação e refrigeração, pois a lubrificação adequada reduz o atrito e o desgaste, enquanto a refrigeração controla o calor gerado durante a operação (FERRARESI, 1970).

Para otimizar esses processos e identificar as melhores configurações em meio às múltiplas variáveis envolvidas, pode-se recorrer ao Box Behnken Design. Essa técnica estatística é especialmente útil na experimentação industrial, permitindo que engenheiros e operadores ajustem de maneira eficaz as variáveis de lubrificação e refrigeração. O BBD utiliza um conjunto de pontos experimentais cuidadosamente escolhidos, com base em um desenho estatístico, para identificar os ajustes ideais. Isso resulta em uma vida útil mais longa para as arestas de corte, reduzindo os custos de manutenção e otimizando a eficiência das ferramentas de corte em ambientes industriais desafiadores (MONTGOMERY, 2012).

1.1 Tema

O tema do presente trabalho consiste no estudo comparativo no processo de fresamento frontal, utilizando lubrificação com mínima quantidade de fluido (MQF) e corte a seco em aço SAE 4140, aliado a diferentes parâmetros de corte, e suas influências na textura superficial das amostras usinadas e desgaste de ferramentas de corte.

1.2 Delimitação do tema

Este trabalho delimita-se a investigar a aplicação de diferentes condições de lubrificação e parâmetros de usinagem (velocidade de corte, profundidade de corte e

rotação) no fresamento do aço SAE 4140. Isso a partir de ensaios realizados para avaliar a influência da lubrificação e dos parâmetros de usinagem na textura da superfície usinada, no desgaste da ferramenta e na formação de cavacos, com a utilização do método BBD.

1.3 Problema de pesquisa

Por meio do presente estudo, busca-se solucionar as seguintes questões:

- a) Os diferentes tipos de combinações de parâmetros de corte apresentam resultados distintos nos resultados do processo?
- b) Qual a combinação entre as variações do processo que obteve os melhores resultados durante os ensaios?
- c) O MQF é o melhor processo de lubrificação, se comparado ao corte a seco?

1.4 Hipótese

A utilização do MQF, aliada a parâmetros de corte adequados (velocidade de corte, profundidade de corte e rotação), pode contribuir para a melhoria da qualidade superficial dos corpos de prova, como acabamento e rugosidade, bem como para a redução do desgaste de insertos.

1.6 Objetivo geral

O propósito principal deste estudo é analisar como os parâmetros de corte e os diferentes tipos de lubrificação (corte a seco e MQF), impactam na textura da superfície usinada, no desgaste dos insertos e na formação do cavaco durante o processo de fresamento frontal do aço SAE 4140, visando determinar a combinação mais eficaz.

1.7 Objetivos específicos

São objetivos específicos do presente trabalho:

- a) analisar a influência dos parâmetros de corte na rugosidade superficial do material usinado;
- b) avaliar a confiabilidade do processo de usinagem utilizando o método da ANOVA a partir do BBD;
- c) comparar a rugosidade superficial do material usinado a seco e com fluido refrigerante;
- d) estudar a relação entre os parâmetros de entrada e a classificação dos cavacos gerados durante o processo de usinagem;
- e) avaliar a relação entre o tipo de lubrificação (corte a seco e MQF), e o desgaste dos insertos.

1.8 Justificativa

Por volta do século XVIII, os trabalhos de engenharia eram realizados basicamente em madeira, que era usinada com ferramentas em aço carbono. Após avanços tecnológicos, descobertas de novos materiais mais resistentes e criações de novas fontes de energia, a indústria metal mecânica foi impulsionada, surgindo assim as primeiras máquinas-ferramenta. A partir do século XX, surgiram novos produtos feitos a partir de materiais mais duráveis e, assim, mais difíceis de serem usinados. Após o surgimento das ferramentas de aço rápido e, posteriormente, de carboneto de tungstênio, foi possível a usinagem de aços e outros materiais metálicos com maior produtividade (MACHADO *et al.*, 2015).

Uma característica presente nos processos de usinagem é a liberação de energia em forma de calor devido ao alto atrito gerado entre a ferramenta de corte e o material trabalhado. Como consequência do aumento da velocidade do processo para garantir uma maior produtividade, tende-se a gerar maior liberação de calor. No intuito de reduzir esse aquecimento gerado no processo, que pode ser altamente danoso à ferramenta de corte promovendo maior desgaste e, conseqüentemente, má qualidade do produto e alto custo, foram desenvolvidos fluidos de corte (FITZPATRICK *et al.*, 2013).

Segundo Machado *et al.* (2015), aplicando-se uma quantidade considerável de água na região de corte, é possível aumentar a velocidade do processo em 33%, sem prejuízos para a vida útil da ferramenta.

Com base nas informações apresentadas, este estudo tem como propósito avaliar os efeitos da aplicação de diversos parâmetros de corte e insertos durante o processo de usinagem do aço SAE 4140, utilizando a lubrificação MQF. O objetivo é analisar as discrepâncias nos resultados, abrangendo os aspectos da superfície dos materiais usinados, a morfologia dos cavacos e os impactos na durabilidade das ferramentas de corte.

A execução deste trabalho é justificada pela busca de aprimoramento no processo produtivo da empresa Já Industrial. Pretende-se encontrar soluções que proporcionem resultados satisfatórios no aspecto superficial das peças produzidas, além de estabelecer processos cada vez mais estáveis em termos de repetibilidade.

2 REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentado o embasamento teórico sobre os conteúdos apresentados neste estudo, como a usinabilidade dos materiais, os tipos de fluidos de corte, usinagem com mínima quantidade de fluido (MQF), ferramentas de corte, operação de fresagem, parâmetros de corte, superfícies usinadas, formação de cavaco e projeto de experimentos.

2.1 Usinabilidade dos metais

Segundo Ferraresi (1970) e Diniz *et al.* (2014), a usinabilidade de um metal se define por uma grandeza que expressa de forma comparativa o valor de um conjunto de propriedades na usinagem de metais, utilizando outros metais como forma de comparação. As propriedades de usinagem são aquelas que influenciam no processo de usinagem, sendo elas a vida da ferramenta, a força de usinagem, o acabamento superficial da peça, a temperatura de corte, a produtividade e as características do cavaco. De uma outra forma, pode-se definir a usinabilidade como a dificuldade de usinar um determinado material. Para Ferraresi (1970, p. 152):

Pode-se ter um material que tenha uma boa usinabilidade quando se leva em conta uma propriedade de usinagem, por exemplo, a vida da ferramenta, e não possua boa usinabilidade quando toma outra propriedade como rugosidade da peça usinada. Mas a usinabilidade não depende somente das condições intrínsecas do material, mas das condições de usinagem características da ferramenta, condições da refrigeração e rigidez do sistema máquina-ferramenta-peça-dispositivo de fixação e tipos de trabalho executados pela ferramenta.

É de fácil analogia propor que a usinabilidade está ligada diretamente à dureza da peça e à sua resistência mecânica. Isso leva a crer que um material mole é de alta

usinabilidade e um material duro é de baixa usinabilidade. No entanto, esse pensamento não é correto. Embora dureza e resistência mecânica sejam, sim, parâmetros que influenciam na usinabilidade, existem outros fatores que são fundamentais, são eles: a quantidade utilizada de aditivos que melhorem a usinabilidade, o número de partículas duras, a microestrutura, a tendência ao empastamento do cavaco do material na superfície de saída da ferramenta, entre outros. Um exemplo muito conhecido é o aço inoxidável 303, que possui, em sua composição, sulfeto de manganês, o que melhora muito sua usinabilidade, e dureza idêntica ao tipo 316. Porém, a usinabilidade do tipo 303 é muito superior à do 316 (DINIZ *et al.*, 2014).

Ainda segundo Diniz *et al.* (2014), dureza e resistência mecânica são parâmetros altamente importantes na usinabilidade, pois valores de baixa dureza e resistência mecânica auxiliam para uma boa usinabilidade. Entretanto, em materiais altamente dúcteis (que são materiais com alta deformação plástica antes do rompimento), a baixa dureza pode causar grandes problemas, pois esse tipo de material facilita a formação de um fenômeno chamado aresta postiça, que ocorre quando o material a ser usinado aderiu à ferramenta de corte durante o processo de usinagem.

Geralmente, baixos valores de ductilidade são positivos em se tratando de usinabilidade, pois a formação de cavacos curtos facilita a expulsão do cavaco durante a usinagem, reduzindo, desta forma, o atrito do cavaco com o ângulo de saída da ferramenta de corte (DINIZ *et al.*, 2014).

De acordo com Ferraresi (1970), a rugosidade superficial da peça também é outro grande fator levado em consideração na usinabilidade dos metais. Ao longo do tempo, verificou-se que materiais produzidos nas mesmas condições de usinagem e com ferramentas e máquinas iguais apresentam valores de rugosidade superficial distintos. Sendo assim, entende-se que se constitui uma propriedade de usinagem com grande influência no índice de usinabilidade dos materiais.

Diniz *et al.* (2014) afirmam que materiais com alta condutividade térmica favorecem a usinabilidade, em virtude de o calor gerado ser rapidamente removido da região de corte. Então, a ferramenta não é aquecida de forma intensa e, sendo assim, não se desgasta de forma precoce. Entretanto, deve-se levar em consideração o fato de que, se o material tem elevada condutividade térmica, grande parte do calor gerado

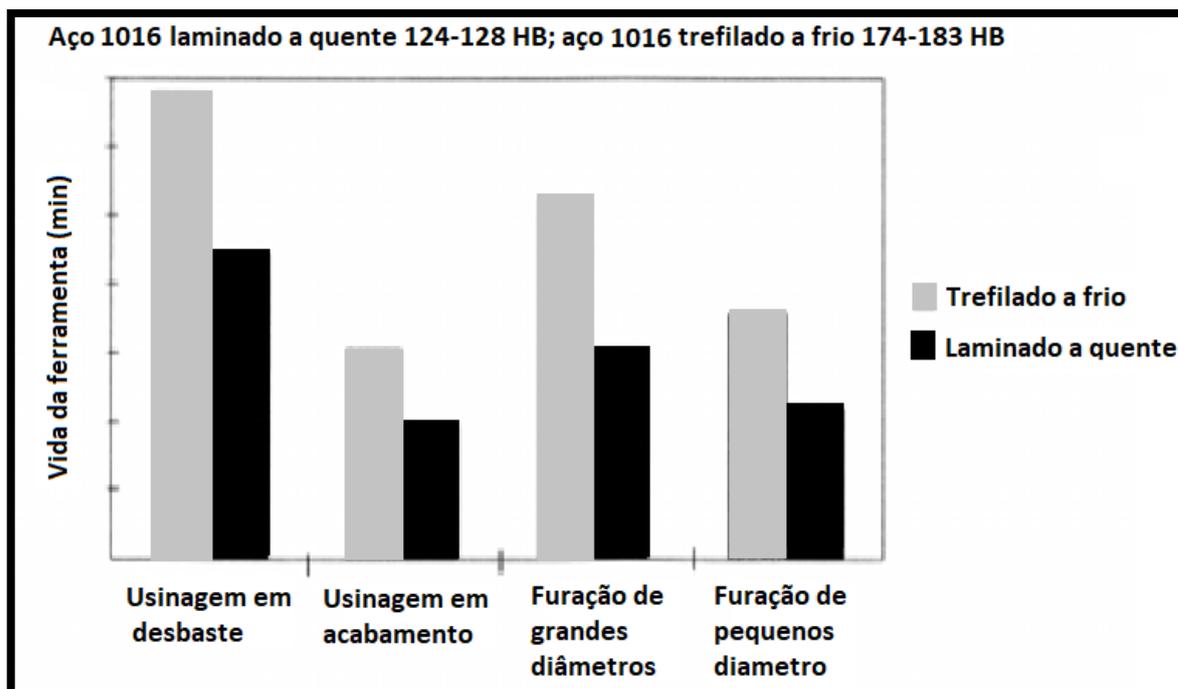
fica retido na peça, podendo gerar uma dilatação térmica e comprometer a tolerância dimensional, por isso é necessária a utilização de refrigeração eficiente.

Um outro fator de grande importância é a taxa de encruamento, que consiste no aumento da resistência mecânica dos metais quando são deformados plasticamente. A elevada taxa de encruamento facilita a formação de aresta postiça, a qual é extremamente prejudicial ao processo. O nível de encruamento é influenciado pela taxa de deformação e pela habilidade do material em encruar. Materiais com alta taxa de encruamento demandam considerável energia para a formação de cavaco, resultando no aumento da pressão de corte e na geração de baixa usinabilidade. Para usinar eficientemente esses tipos de materiais, recomenda-se o uso de ferramentas de corte que possuam arestas afiadas e ângulos de saída positivos, visando sempre a mínima deformação no cavaco final (DINIZ et al., 2014).

Ainda de acordo com Diniz *et al.* (2014), o fator metalúrgico que mais se deve levar em consideração a respeito da usinabilidade é a dureza. Aços com baixa quantidade de carbono tendem a ser mais dúcteis e facilitam a formação de aresta postiça, reduzindo, conseqüentemente, a vida útil da ferramenta. Aços com maior quantidade de carbono diminuem a ductilidade e, portanto, melhoram a usinabilidade. Em questão de valores, pode-se adotar que aproximadamente 200 HB é um valor mediano, abaixo disso tende-se à formação de arestas postiças, e acima deste valor tende-se a aumentar o desgaste da ferramenta por abrasão e difusão.

Diniz *et al.* (2014) relata que, para gerar um aumento da dureza e diminuição da ductilidade de aços de baixo carbono, é necessário promover seu encruamento via trabalho a frio. Conforme a Figura 1, pode-se notar que a vida útil da ferramenta de corte teve expressivo aumento após o material ser submetido a trefilação a frio, sendo que a operação gerou um acréscimo de dureza nos materiais de 125 HB para 180 HB.

Figura 1 – Efeito do encruamento por trefilação a frio na vida da ferramenta



Fonte: Diniz *et al.* (2014, p. 160).

2.2 Propriedades do aço SAE 4140

A microestrutura de um aço se dá a partir do arranjo das estruturas cristalinas de diferentes fases. Devido às várias configurações dos aços, como tamanho, forma, distribuição, composição e estrutura cristalina, as propriedades finais de qualquer aço, como dureza, resistência, ductilidade e resistência ao impacto, são distintas. Grande parte dos metais apresenta apenas uma estrutura cristalina, estável desde a temperatura ambiente até seu ponto de fusão, sendo que as estruturas mais comuns são: cúbica de face centrada (CFC), hexagonal compacta (HC) e a cúbica de corpo centrado (CCC) (REBECHI, 2011).

De acordo com Silva (2012), os aços da família SAE 41xx são aços de baixa liga e podem ter uma série de aplicações. Suas principais características são ligas com cromo com composição de 1% e ao molibdênio com 0,2%, aproximadamente, podendo atingir elevadas resistências através de tratamentos térmicos. Devido à sua alta tensão limite de escoamento entre 410 MPa e 965 MPa, podem ser utilizados em uma alta gama de aplicações, sendo materiais altamente utilizados na indústria tanto em equipamentos mais simples como em equipamentos de elevada responsabilidade, sendo que seu limite de escoamento a tração pode ultrapassar a faixa de 1600 Mpa

com determinado tratamento térmico. Os teores de carbono no aço SAE 4140 estão na faixa de zero 3% a zero 5%.

A Tabela 1 mostra os principais elementos químicos que compõe o aço SAE 4140.

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 4140

| Elemento | | C | Mn | p | Si | S | Cr | Mo |
|----------------|----------|------|------|--------|------|--------|-----|------|
| Quantidade (%) | ASTM A29 | 0,38 | 0,75 | | 0,15 | | 0,8 | 0,15 |
| | | 0,43 | 1 | ≤0,035 | 0,35 | ≤0,040 | 1,1 | 0,25 |

Fonte: ASTM A29 (2015, figura digital).

2.3 Fluidos Lubrificadorantes

Em sistemas de manufatura, toda e qualquer possibilidade para aumentar a produtividade e reduzir custos deve ser analisada. Na usinagem não pode ser diferente. A aplicação de fluidos de corte, quando utilizados de forma apropriada, agrega grandes benefícios ao processo. Os principais objetivos dos fluidos de corte são a lubrificação e a refrigeração durante a usinagem, a remoção dos cavacos da zona de corte e a proteção da máquina-ferramenta e da peça contra a oxidação (MACHADO *et al.*, 2015).

Segundo Machado *et al.* (2015), embora a principal função dos fluidos de corte seja a lubrificação e a refrigeração, existem processos em que a remoção de cavaco se torna crítica, como uma furação profunda, em que são aplicados os fluidos de corte sob alta pressão a fim de evitar o engripamento dos cavacos e, conseqüentemente, fraturas prematuras das ferramentas de corte. A capacidade do fluido de remover cavaco depende principalmente das condições em que ele é aplicado, como a vazão, a viscosidade, os parâmetros de corte e os tipos de cavacos gerados.

Quando a aplicação do fluido de corte é de lubrificação, ele contribui para a redução do atrito e da área de contato entre ferramenta e cavaco – quanto maior for sua capacidade de penetração entre a ferramenta e o cavaco, maior será a sua eficiência. Quando sua aplicação é a de refrigeração, o fluido favorece a transferência de calor da região de corte, assim reduzindo a temperatura da ferramenta de corte e

da peça – mesmo que no ponto de contato entre a ferramenta e o cavaco a temperatura não sofra significativa alteração. Conforme foi demonstrado experimentalmente por MACHADO *et al.* (2015), a eficiência do fluido de corte em reduzir a temperatura diminui consideravelmente com o aumento da velocidade de corte e da profundidade de corte (MACHADO *et al.*, 2015).

Segundo VALIM *et al.* (2018), a utilização de lubrificação acarreta a diminuição do coeficiente de atrito entre a ferramenta de corte e o cavaco, desta forma reduzindo o esforço de corte, ou seja, a potência necessária de corte e a temperatura. Por efeito de capilaridade o fluido entra na região de contato. O efeito de lubrificação sofre redução de forma proporcional ao aumento da velocidade de corte, pois desta forma ele encontra maior dificuldade para atingir o ponto de contato entre a peça e a ferramenta de corte.

A Figura 2 exemplifica o processo de fresamento com fluido abundante.

Figura 2 – Fresamento com fluido abundante



Fonte: Valim *et al.* (2018, p. 108).

2.3.1 Classificação dos fluidos de corte

Machado *et al.* (2015) descrevem que há muitas formas de classificar os fluidos de corte. Ainda que esteja descrita na literatura técnica a utilização de fluidos de corte gasosos e sólidos, os fluidos líquidos representam a maior parte das aplicações em

operações de usinagem. O fluido de corte gasoso mais comumente utilizado é o ar comprimido, cuja principal função é expulsar os cavacos da região de corte. A utilização de fluidos gasosos refrigerados a temperaturas negativas, por conta do seu elevado custo, ainda não é uma opção viável. Sendo, ainda, os mais utilizados, os fluidos líquidos são classificados nas seguintes categorias: óleos, emulsões e soluções.

2.3.1.1 Óleos

Os primeiros óleos a serem utilizados na usinagem dos aços foram os de origem vegetal e animal, mas esses óleos foram rapidamente se tornando inviáveis em função do custo e da rápida deterioração. Entretanto, são ainda empregados como aditivos nos fluidos minerais com o intuito de melhorar suas propriedades lubrificantes. Mesmo que sejam eficientes na redução do atrito, sua condutividade térmica é muito baixa, desta forma se tornando ineficaz na condução de calor para fora da região de corte (MACHADO *et al.*, 2015).

Ainda segundo Machado *et al.* (2015), os óleos minerais são hidrocarbonetos oriundos do petróleo. A utilização desses óleos tem perdido espaço para os óleos emulsionáveis, por conta do seu alto custo, do baixo ponto de fulgor (risco de incêndio), da ineficiência em altas velocidades de corte e do baixo poder refrigerante.

2.3.1.2 Emulsões

Esses tipos de fluidos são compostos bifásicos de óleos minerais ou vegetais misturados à água entre proporções de 1:10 a 1:100, adicionados de agentes emulsificantes ou surfactantes que ajudam na uniformidade da mistura (MACHADO *et al.*, 2015).

A fim de evitar a corrosão devido à água misturada na emulsão, são adicionados aditivos anticorrosivos, como o nitrito de sódio, também podendo ser utilizados biocidas para evitar o crescimento de bactérias e fungos (MACHADO *et al.*, 2015).

2.3.1.3 Soluções

Diferentemente das emulsões, as soluções são compostos monofásicos de óleos que se dissolvem completamente na água, não necessitando, assim, de adição de agentes emulsificantes. Também podendo ser chamados de fluidos sintéticos, sua principal característica é de não conterem óleos minerais ou vegetais. São basicamente compostos orgânicos e inorgânicos, aditivos de lubricidade biocidas, inibidores de corrosão, entre outros (MACHADO *et al.*, 2015).

2.4 Seleção do fluido de corte

De acordo com Valim *et al.* (2018) e Diniz *et al.* (2014), os principais fatores que implicam na escolha do fluido de corte são o material da peça, o material da ferramenta de corte e o tipo de operação e sua severidade.

As emulsões são mais adequadas nas ligas de fácil usinagem, uma vez que não necessitam de grandes esforços durante o processo. Por outro lado, emulsões com óleos graxos são mais adequadas para ligas de latão (sem chumbo), bronze ao fósforo, bronze ao silício e ligas de usinabilidade moderna. Para ligas de chumbo, prata e bronze ao fósforo, que são classificados como de difícil usinagem, é recomendada uma mistura de óleo mineral e óleos graxos (VALIM *et al.*, 2018).

Ainda de acordo com Valim *et al.*, (2018) nos casos de ligas de titânio, níquel e cobalto, pelo fato de serem resistentes ao calor, a escolha do fluido de corte deve levar em consideração o tipo de operação e a tenacidade da liga. Alguns materiais, como o ferro fundido, são normalmente usinados a seco, nesse caso pode-se aplicar ar comprimido, principalmente em aberturas de cavidades, a fim de eliminar os cavacos da região de corte.

2.4.1 Material da ferramenta

De acordo com Valim *et al.* (2018), ferramentas de aço carbono, aço-liga e aços rápidos desgastam-se com mais facilidade em temperaturas elevadas. Por esse motivo, faz-se necessário o emprego de fluidos de corte com maior efeito refrigerante. Em materiais com maior tenacidade é recomendada a utilização de aditivos antissoldantes. Fluidos emulsionáveis também são recomendados em processos com

a utilização de ferramentas de corte como metal duro, ligas fundidas e cermets. Em ferramentas de cerâmica é necessário averiguar a necessidade da utilização de fluidos refrigerantes devido ao fato de serem extremamente sensíveis ao choque térmico.

Também segundo Diniz *et al.* (2014), deve-se ter cuidado ao utilizar fluidos aquosos em operações com ferramentas de aço rápido devido ao desgaste por corrosão, devendo ser aplicado algum aditivo antiferrugem nessas condições.

2.4.2 Operação e sua severidade

Óleos de emulsão e de baixo peso molecular são indicados para operações em que as ferramentas permanecem em contato com a peça durante todo o processo, como no torneamento. Por outro lado, em operações de fresagem e corte interrompido, é aconselhável a utilização de óleos mais concentrados (VALIM *et al.*, 2018).

De acordo com Diniz *et al.* (2014), em condições severas de usinagem, nas quais se tem altas profundidades de corte (A_P), porém baixa velocidade de corte (V_C), e forças de corte elevadas, são utilizados óleos puros. As baixas velocidades facilitam a entrada do fluido na região de corte (interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça). Para situações de usinagem mais brandas, em que o avanço e a A_P são mais baixos e o V_C mais alto, são aplicados fluidos aquosos.

2.5 Usinagem a seco e com mínima quantidade de fluido (MQF)

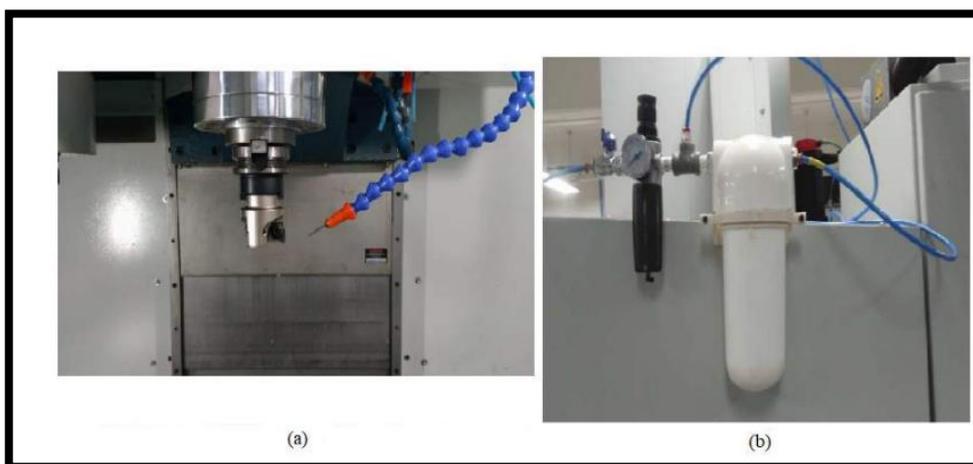
Muitos estudos são realizados na busca por melhores condições de usinagem. Segundo Diniz *et al.* (2014), duas técnicas distintas se mostram eficazes na busca por minimizar o uso de fluidos de corte. Uma delas é a usinagem a seco, ou sem fluido de corte, neste caso é necessário que sejam utilizadas condições e parâmetros de usinagem adequados. Em relação aos materiais utilizados para a composição das ferramentas, muitos estudos são realizados com a utilização de metal duro e coberturas das ferramentas com ligas de TiCN, TiAlN e diamante. O cermet e os materiais cerâmicos são opções quando se trata de corte sem fluido – algumas dessas ferramentas, como, principalmente, as de cermet, nem devem ser utilizadas com a aplicação de fluidos líquidos, pois se trata de materiais altamente sensíveis ao choque térmico.

A técnica de Mínima Quantidade de Fluido (MQF) é uma abordagem eficaz para reduzir o uso excessivo de fluidos de corte na usinagem, promovendo práticas sustentáveis. A MQF permite vazões muito baixas, chegando a 0,1 ml/h, em contraste com as vazões altas em sistemas convencionais. Essa estratégia consciente contribui para a sustentabilidade ao minimizar o consumo de recursos e os impactos ambientais (TOLEDO; ROSA; WREGE, 2021).

No processo MQF, uma pequena quantidade de líquido é transportada por uma corrente de ar comprimido direcionada para a zona de corte. Devido à alta pressão do ar, o líquido se dispersa em partículas extremamente pequenas, formando um vapor que lubrifica a área de usinagem. Essa técnica pode aplicar o líquido de corte de duas maneiras: por meio de orifícios na ferramenta ou pulverizado por fora da ferramenta em forma de aerossol. Essas abordagens minimizam o consumo de líquido, garantindo uma lubrificação eficiente durante o processo de usinagem (RIBEIRO, 2017).

A Figura 03 mostra o processo de fresamento com a utilização do processo MQF.

Figura 03 – Fresamento com a utilização do processo MQF



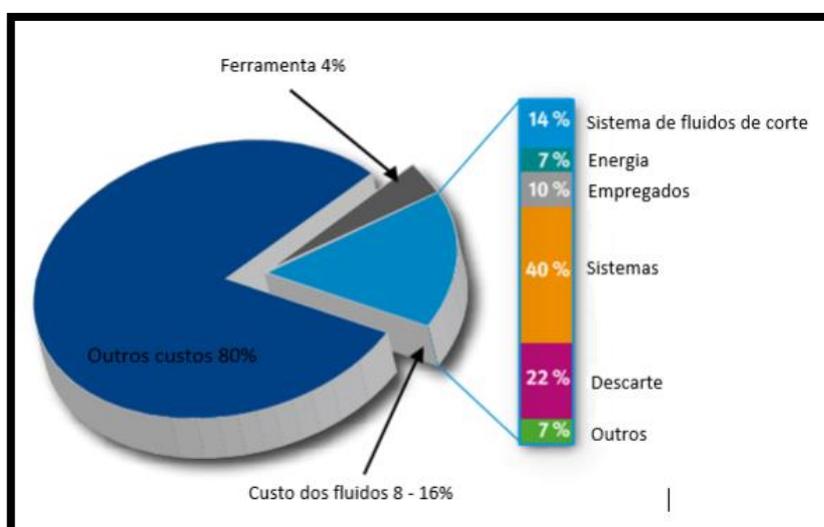
Fonte: Toledo; Rosa; Wrege (2021, p. 3).

Zeilmann *et al.* (2009) ressaltam a importância da adoção da técnica de MQF como uma opção ambientalmente sustentável e segura para os operadores, desde que sejam observados cuidados essenciais relacionados à coleta de resíduos. A integração de vedação eficaz, sistemas de aspiração e coleta adequados para cavacos e névoa de óleo atomizada nas máquinas é crucial para evitar a rápida

dispersão de gotículas de óleo no ambiente fabril, o que pode contaminá-lo e colocar em risco a saúde dos trabalhadores. Além disso, destacam que a redução do uso de fluidos de corte não apenas promove benefícios ambientais, como a preservação do meio ambiente e a redução de custos, mas também melhora as condições de trabalho na indústria, constituindo um diferencial competitivo valioso para as empresas da indústria automotiva em um mercado altamente competitivo.

Segundo Ribeiro (2017), a técnica conhecida como MQF busca minimizar a quantidade de fluido de corte utilizada durante processos de usinagem. Essa abordagem, que emprega quantidades entre 5 ml/h e 50 ml/h de fluido, podendo chegar a 150 ml/h em ferramentas maiores, é uma estratégia desenvolvida nos anos 90 pela indústria automobilística para otimizar os custos de produção associados à aplicação excessiva de fluidos de corte. Esses custos incluem manutenção, inspeção, preparação e descarte de cavacos. O MQF é uma solução quase "a seco", eliminando a necessidade de secagem e tornando o descarte mais econômico e eficiente, enquanto reduz danos à saúde dos operadores e proporciona um ambiente de trabalho mais limpo e organizado. A Figura 04 apresenta os custos envolvidos na utilização de fluidos de corte em abundância, demonstrando a variedade custos envolvidos.

Figura 04 – Custos relacionados à utilização de fluidos de corte em abundância

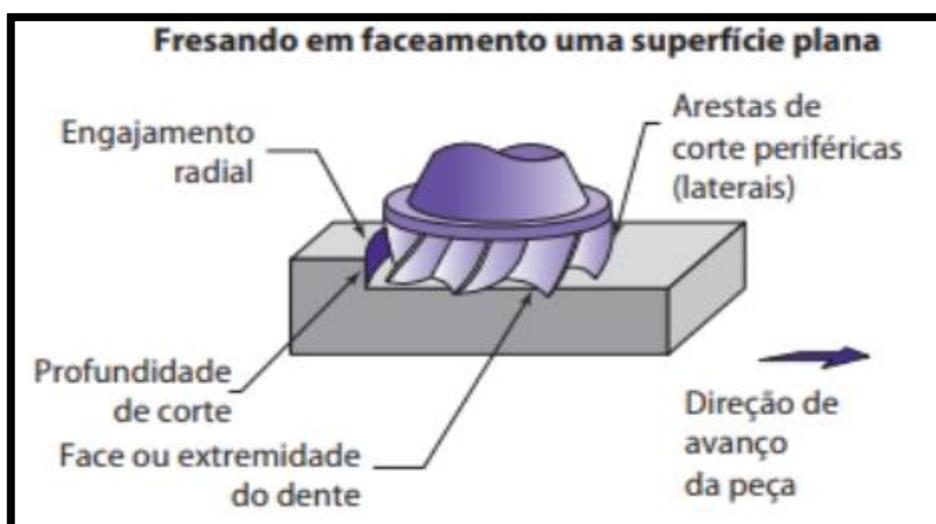


Fonte: Ribeiro (2017, p. 30).

2.6 Operação de Fresamento

Conforme aponta Fitzpatrickv (2013), as operações de fresagem usualmente se dividem em vários tipos de movimentos, sendo quatro grupos principais: faceamento, perfilamento, furação e perfuração. A operação fundamental é, sem sombra de dúvidas, o faceamento, em que a ferramenta de corte é aplicada sobre a superfície da peça até a profundidade de corte (PDC) e é ajustada para engatar a peça a uma determinada porção do seu diâmetro, denominado corte radial (CR). O CR é considerado como uma porcentagem do diâmetro da ferramenta de corte que está em contato com a peça. A Figura 5 apresenta o fresamento de face.

Figura 5 – Fresamento de face



Fonte: Fitzpatrick (2013, p. 231).

A fresagem de face normalmente é realizada com 3 tipos de ferramentas de corte: fresas de faceamento, fresas de topo e cortadores flutuantes. As fresas de faceamento são cortadores fabricados diretamente para este processo e são comumente fabricadas de aço rápido ou carboneto. As fresas de topo são cortadores também muito usados para facear, pois possuem dentes de corte nas laterais e na extremidade. Elas também podem ser mergulhadas através da peça como uma broca de furação. Os cortadores flutuantes são ferramentas de um único dente e são mais utilizados em trabalhos de manutenção e ferramentaria, considerando-se a necessidade de o corte ser lento (FITZPATRICK, 2013), conforme mostra a Figura 6.

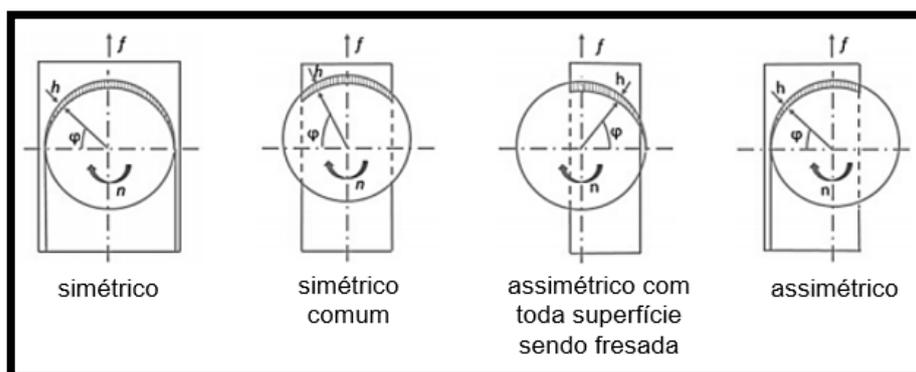
Figura 6 – Cabeçote intercambiável



Fonte: Kennametal (2023, figura digital).

De acordo com Garcia (2019), o fresamento apresenta distintas condições de corte influenciadas pelo ângulo de contato do dente da fresa com a peça. No início, o corte concordante é caracterizado por uma determinada espessura máxima de corte (h), diminuindo à medida que a fresa avança na peça, típico em fresamentos assimétricos. Em contraste, no corte discordante, a espessura de corte (h) começa mínima e aumenta à medida que a fresa avança, também comum em fresamentos assimétricos. Por fim, no corte combinado, ou fresamento simétrico, a espessura de corte (h) varia ao longo do processo, iniciando discordante e transitando para concordante, promovendo uma oscilação controlada da espessura de corte. A seleção apropriada entre essas condições é crucial para otimizar o fresamento, afetando a eficiência da remoção de material, a dissipação de calor e a vida útil da ferramenta de corte. A Figura 7 mostra os tipos de fresamento frontal.

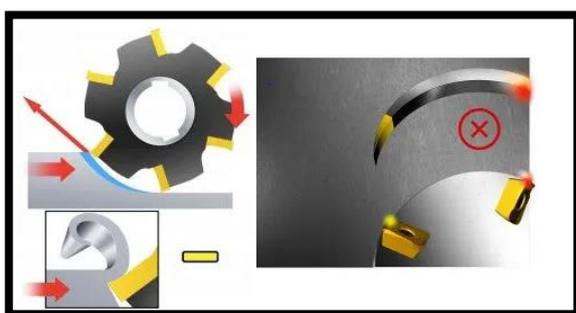
Figura 7 – Tipos de fresamento frontal



Fonte: adaptado Diniz *et al.* (2014).

No fresamento discordante a ferramenta de corte avança em direção oposta à sua rotação. Isso resulta em uma espessura de cavaco que começa em zero e aumenta progressivamente até o final do corte. Para efetuar o corte, a aresta de corte precisa ser pressionada para dentro da peça, gerando atrito e altas temperaturas devido ao contato com a superfície endurecida pelo trabalho realizado pela aresta anterior. Esses fatores contribuem para a redução da vida útil da ferramenta de corte (SANDVIK, 2023). A Figura 8 ilustra o fresamento discordante.

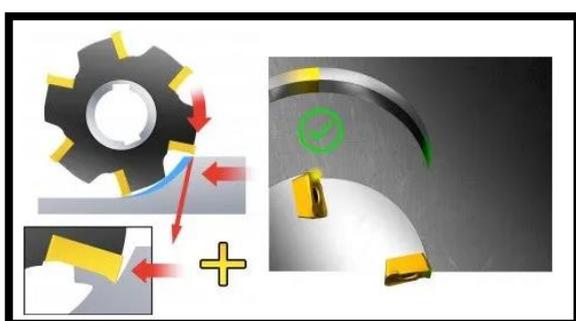
Figura 8 – Fresamento discordante



Fonte: Sandvik (2023, figura digital).

No fresamento concordante a ferramenta de corte se move na direção da rotação. Esse método é amplamente recomendado sempre que as condições da máquina-ferramenta, fixação e peça o permitirem. Na modalidade periférica do fresamento concordante, a espessura dos cavacos diminui a partir do início do corte, aproximando-se gradualmente de zero até o final do processo. Essa abordagem evita o esfregamento e a queima da aresta de corte contra a superfície antes do início da remoção de material (SANDVIK, 2023). A Figura 9 ilustra o fresamento concordante.

Figura 9 – Fresamento concordante



Fonte: Sandvik (2023, figura digital).

2.7 Desgaste e vida da ferramenta

De acordo com Diniz *et al.* (2014) e Machado *et al.* (2015), a vida da ferramenta é o tempo que ela trabalha até perder sua capacidade de cortar o material. O percurso de corte (l_c) e o percurso de avanço podem ser expressos pelas equações abaixo, em que l_c e l_f podem ser utilizados para definir a vida das ferramentas, sendo:

$$l_c = \frac{V_c \cdot t}{1000} \quad (\text{Km}) \quad (1)$$

$$l_f = f_z \cdot n \cdot t \quad (\text{mm}) \quad (2)$$

Em que:

f_z = avanço de corte (mm/dente);

V_c = velocidade de corte (m/min);

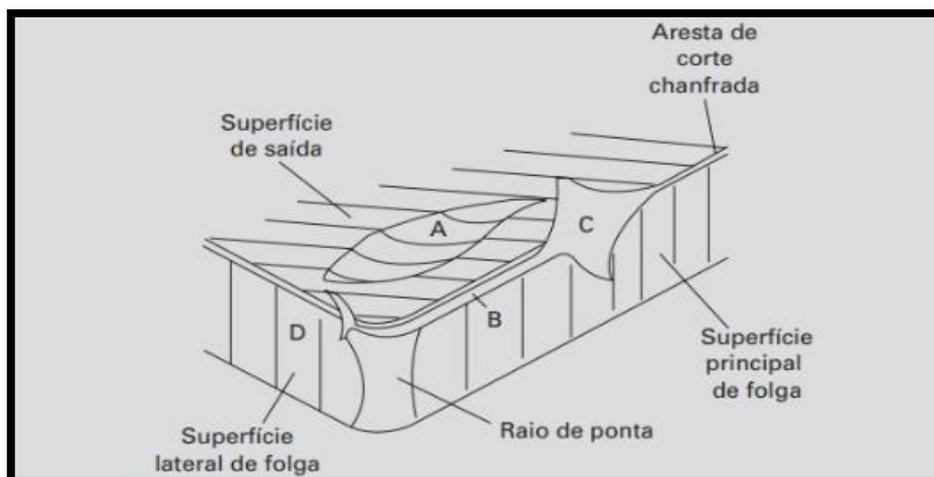
n = rotação (Rpm);

t = tempo (min).

As causas que indicam um determinado valor de desgaste da ferramenta de corte são várias. O desgaste pode atingir grandes proporções, que podem levar à quebra da aresta de corte. Devido a essa degradação da superfície da ferramenta, torna-se impossível a obtenção de tolerâncias apertadas e bom acabamento da peça. O desgaste cresce tanto que faz com que a temperatura de corte ultrapasse a temperatura em que a ferramenta perde o fio de corte, principalmente em ferramentas de aço rápido, que suportam temperaturas menores. Já nas ferramentas de metal duro o desgaste geralmente é maior do lado frontal do que o de cratera. Esses fenômenos de deterioração da ferramenta de corte aumentam gradativamente até a quebra da cunha de corte (DINIZ *et al.*, 2014).

Ainda de acordo com Diniz *et al.* (2014) e Machado *et al.* (2015), existem diversos tipos de desgastes que podem ocorrer nos insertos durante a usinagem. A Figura 10 mostra os principais locais onde eles ocorrem, onde A desgaste de cratera, B desgaste de flanco, C e D desgaste de entalhe.

Figura 10 – Formas de desgaste



Fonte: Machado *et al.* (2015, p. 277).

Os principais tipos de desgaste que ocorrem nas ferramentas durante a usinagem são: desgaste frontal ou de flanco, desgaste de entalhe, desgaste de cratera, deformação plástica ou de aresta de corte, lascamento e trincas (DINIZ *et al.*, 2014).

O desgaste frontal ou de flanco é o principal tipo de desgaste que ocorre nas ferramentas de corte devido ao atrito com a superfície da peça usinada. À medida que se desgasta, a aresta de corte se retrai e, conseqüentemente, a dimensão da peça usinada se altera (DINIZ *et al.*, 2014), conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 – Desgaste de flanco



Fonte: Sandvik (2023, figura digital).

O desgaste de entalhe ocorre nos dois extremos de contato entre a superfície da ferramenta e a peça. Ele muda a forma da ponta da ferramenta e, assim, interfere

no acabamento da superfície usinada. Mostrada na Figura 12, esta forma de desgaste acontece principalmente em ocasiões em que ocorre o aumento da temperatura e da velocidade de corte (DINIZ *et al.*, 2014).

Figura 12 – Desgaste de entalhe



Fonte: Sandvik (2023, figura digital).

O desgaste de cratera ocorre na superfície de saída da ferramenta, e seu causador é o atrito entre a ferramenta e o cavaco. Para que se minimize esse tipo de desgaste, podem ser utilizadas ferramentas de metal duro recobertas – com a cobertura Al_2O_3 , por exemplo, que é uma cobertura ideal contra a craterização (DINIZ *et al.*, 2014). A Figura 13 demonstra esse tipo de desgaste.

Figura 13 – Desgaste de cratera



Fonte: Sandvik (2023, figura digital).

A deformação plástica ou de aresta de corte é um tipo de avaria que ocorre na ponta da ferramenta. Em grande parte das vezes, a pressão somada à temperatura aplicada à ponta da ferramenta gera uma deformação plástica na aresta de corte. Conforme mostrado na Figura 14, esta deformação provoca uma deficiência do

controle do cavaco e de teorização do acabamento superficial da peça, o aumento desta deformação pode gerar fratura de aresta de corte. A melhor forma de evitar essa deformação é a utilização de ferramentas com maior dureza a quente e maior resistência à deformação plástica, ou a alteração das condições de usinagem (DINIZ *et al.*, 2014).

Figura 14 – Deformação plástica



Fonte: Sandvik (2023, figura digital).

Diferentemente do desgaste frontal e do de cratera, que removem continuamente pequenas partículas da ferramenta, no lascamento partículas maiores são retiradas subitamente, como demonstrado na Figura 15. Seu principal fator de ocorrência é a utilização de materiais frágeis, ou com arestas de corte pouco reforçadas. Este tipo de desgaste prejudica o acabamento superficial da peça e, com o seu aumento, provoca a quebra da ferramenta (DINIZ *et al.*, 2014).

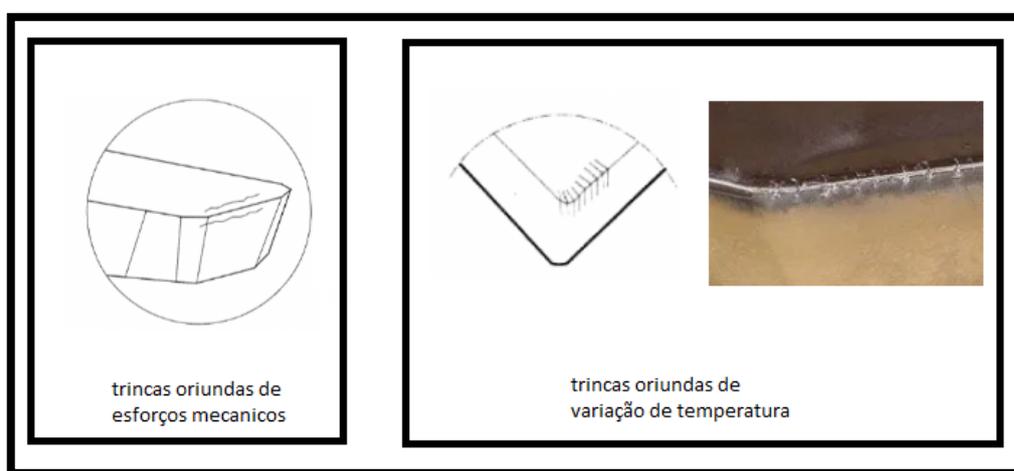
Figura 15 – Lascamento e quebra



Fonte: Sandvik (2023).

Trincas são avarias que se formam a partir de variação da temperatura ou esforços mecânicos. Conforme a Figura 16, se forem de origem térmica, as trincas irão ocorrer de forma perpendicular à aresta de corte e, quando têm origem mecânica, serão paralelas à aresta. Para evitar este tipo de avaria, deve-se, principalmente, escolher ferramentas mais tenazes, diminuir o avanço por dente e garantir o melhor posicionamento da fresa em relação à peça. A melhor forma de evitar trincas pela variação da temperatura é a utilização de corte a seco, ou seja, sem fluido de corte (DINIZ *et al.*, 2014).

Figura 16 – Trincas na ferramenta



Fonte: Adaptada de Sandvik (2023, figura digital).

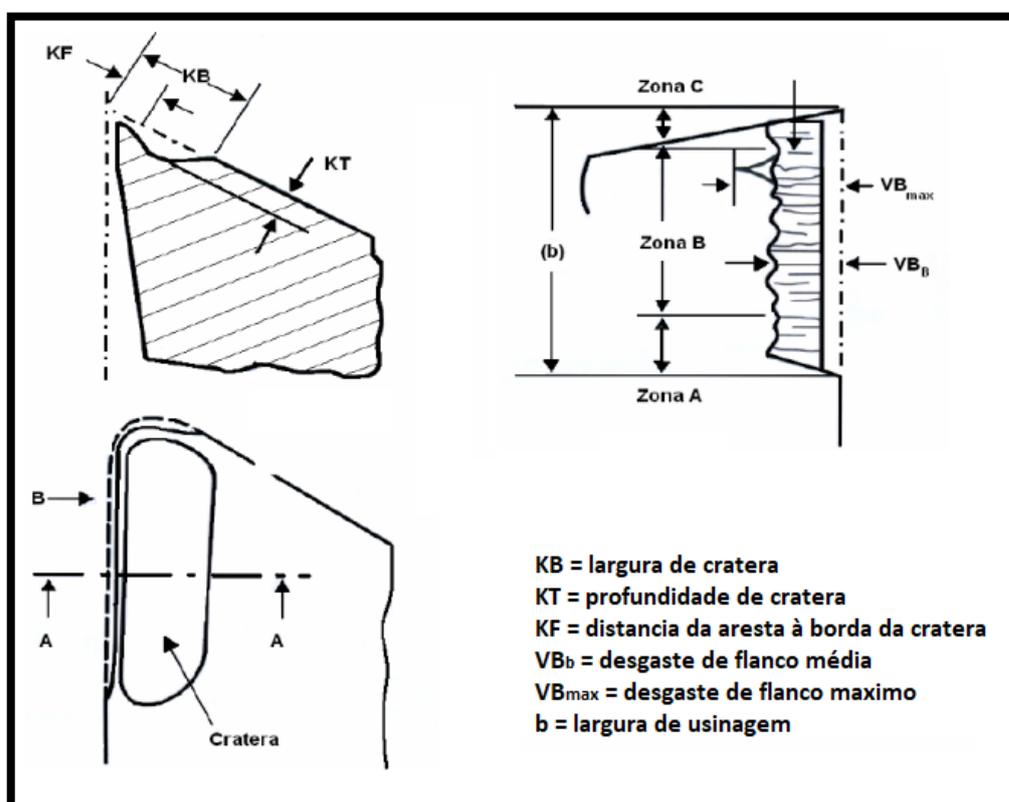
2.7.1 Medição do desgaste da ferramenta

Conforme estabelecido na Norma ISO 3685 (1993), a avaliação do desgaste na superfície de folga das ferramentas de corte envolve a consideração de parâmetros fundamentais. Dois desses parâmetros principais são o desgaste médio de flanco (VB_B) e o desgaste máximo de flanco (VB_{max}). O desgaste de flanco ocorre na superfície lateral da ferramenta de corte, e sua medição é essencial para determinar a integridade e a vida útil da ferramenta. Outro aspecto relevante é o desgaste da cratera, que é medido na superfície de saída da ferramenta. Dois dos principais parâmetros para medir o desgaste da cratera são a largura de cratera (KB) e a profundidade da cratera (KT). Esses valores fornecem informações cruciais sobre o estado da ferramenta (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1993).

Para garantir a segurança e a qualidade das operações de usinagem, estabelece-se que, em ensaios de fim de vida em ferramentas de aço rápido, metal-ferro e cerâmica, o desgaste médio VB_B não deve exceder 300 μm , e o desgaste máximo VB_{max} não deve ultrapassar 600 μm . Isso significa que, quando esses valores são atingidos, a ferramenta deve ser substituída para manter o desempenho adequado (ABNT, 1993).

Vale ressaltar que o desgaste de flanco (VB) é frequentemente usado como critério para determinar o fim de vida da ferramenta. Isso ocorre porque o desgaste de flanco não apenas afeta a vida útil da ferramenta, mas também tem um impacto direto na rugosidade e na precisão dimensional das peças usinadas. Portanto, é um indicador crucial para garantir a qualidade das peças produzidas (DAVIM, 2008).

Figura 17 – Medição do desgaste



Fonte: Adaptado de ISO 3685 (ABNT, 1993).

2.7.2 Mecanismos causadores de desgaste

Dentre muitos, os principais fenômenos causadores de desgaste nas ferramentas são: aresta postiça de corte, abrasão mecânica, aderência, difusão e oxidação (DINIZ *et al.*, 2014).

Durante a usinagem pode se formar uma camada de material da peça usinada na superfície de contato entre o cavaco e a saída da ferramenta, o que faz com que o comportamento da usinagem se modifique em relação à força de corte, ao acabamento superficial e ao desgaste da ferramenta. Com o constante fluxo de cavaco sobre esse material já existente preso na ferramenta, ele se deforma e encrua, aumentando sua resistência mecânica e agindo como uma nova aresta de corte, a chamada aresta postiça. Essa aresta tende a aumentar gradativamente até se romper, causando uma perturbação dinâmica, em que parte dela se adere a peça causando avarias na superfície usinada (DINIZ *et al.*, 2014).

A abrasão mecânica é um tipo de fenômeno que ocorre tanto na parte frontal quanto na cratera da ferramenta, em decorrência do atrito gerado entre a ferramenta e a peça usinada. Esse desgaste é gerado pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte, que reduz a dureza da ferramenta. Consequentemente, quanto maior for a dureza da ferramenta maior será a resistência ao desgaste por abrasão (DINIZ *et al.*, 2014).

A aderência é um fenômeno em que as partículas da ferramenta são removidas pelo movimento contínuo de escorregamento entre as superfícies da ferramenta e da peça. Esse fenômeno também está presente na formação de aresta postiça de corte, porém pode ocorrer desgaste por aderência mesmo sem a formação da aresta postiça (DINIZ *et al.*, 2014).

A difusão é um fenômeno microscópico que ocorre através da temperatura na zona de corte. A difusão no estado sólido se dá através da transferência de átomos de um metal ao outro. Ela depende de vários fatores, dentre eles a duração do contato, a afinidade físico-química, a intensidade do contato e a temperatura, e é uma das principais causas do desgaste de cratera (DINIZ *et al.*, 2014).

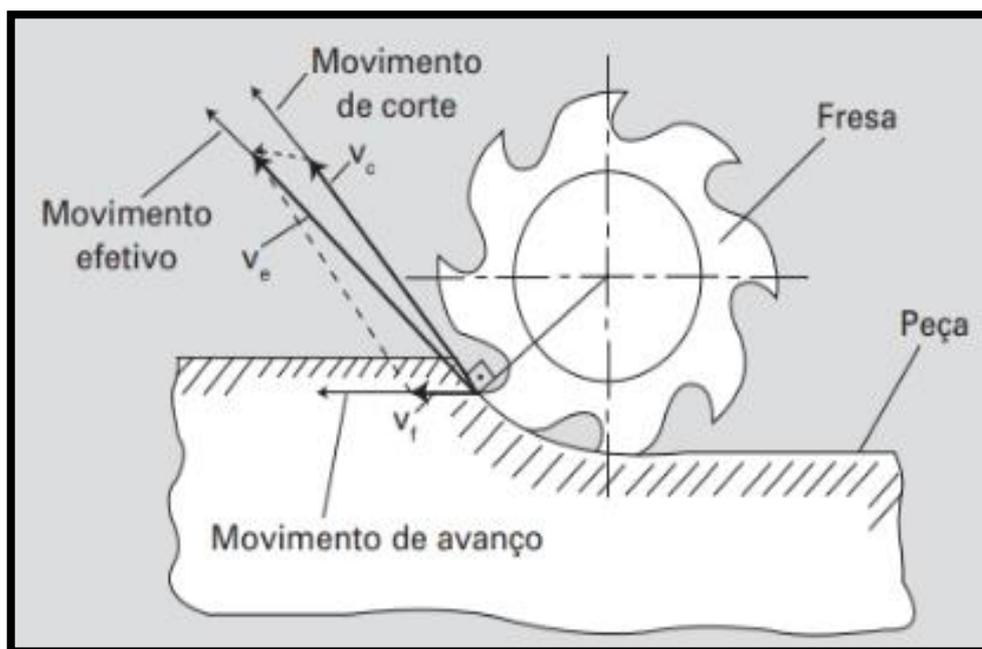
Na maioria dos metais a oxidação ocorre com a presença de ar e água aliados à alta temperatura. Porém, a maioria dos fluidos de corte contém elementos antioxidantes. Sendo assim, o fluido de corte não causa a oxidação, entretanto, se

não armazenado de forma adequada, ele pode se tornar ácido e provocar oxidação na ferramenta (DINIZ *et al.*, 2014).

2.8 Grandezas e movimentos no processo de usinagem

As características dos movimentos nos processos de usinagem são relativas à aresta cortante da ferramenta e à peça e distinguem-se entre dois tipos de movimento: os que causam remoção de cavaco e os que não tomam parte direta na formação do cavaco. Conforme demonstrado na Figura 18, o movimento que causa a remoção do cavaco é o movimento efetivo resultante dos movimentos de corte e de avanço. Os movimentos que não causam remoção do cavaco são: os movimentos de aproximação, em que se aproximam a ferramenta de corte e a peça; o movimento de ajuste, no qual se determina a quantidade de material que será removida; e o movimento de recuo, em que a ferramenta é afastada após a usinagem. (MACHADO *et al.*, 2015; FERRARESI, 1970).

Figura 18 – Movimentos de corte



Fonte: Machado *et al.* (2015, p. 29).

De acordo com Diniz *et al.* (2014): os eixos de orientação dos movimentos são suas direções instantâneas; os sentidos são os resultantes quando se leva em

consideração a ferramenta em movimento, realizando o movimento de corte, e a peça parada; e as velocidades dos movimentos serão suas velocidades instantâneas.

2.8.1 Velocidade de corte (V_c)

Ainda de acordo com Diniz *et al.* (2014), esta grandeza se caracteriza pelo resultado do deslocamento da ferramenta em relação à peça, considerada no tempo. A velocidade de corte é definida como a velocidade tangencial instantânea a partir da rotação da ferramenta ao redor da peça, em operações como torneamento, fresamento e furação, em que os movimentos de avanço e corte ocorrem ininterruptamente. A velocidade de corte pode ser expressa como:

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (3)$$

Em que:

V_c = velocidade de corte (m/min);

d = diâmetro (mm);

n = rotação (rpm).

2.8.2 Velocidade de avanço (V_f)

A velocidade de avanço é dada pelo produto do avanço pela rotação da ferramenta, conforme equação abaixo:

$$V_f = f_z \cdot n = \frac{1000 \cdot V_c \cdot \eta}{\pi \cdot d} \cdot f_z \quad (4)$$

Em que:

F_z = avanço (mm/dente);

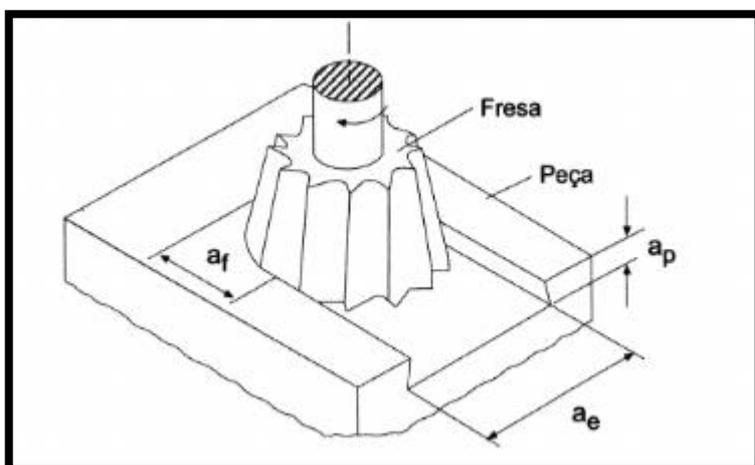
V_f = velocidade de avanço (mm/minuto).

2.8.3 Grandezas de penetração

A profundidade de penetração (a_p) é utilizada para caracterizar a relação entre a ferramenta de corte e a peça usinada e é medida de forma perpendicular ao plano de trabalho. Em processos como torneamento e fresagem, a a_p é definida como profundidade de usinagem. A penetração de trabalho (a_e) caracteriza-se pela penetração da ferramenta em sentido perpendicular à direção do avanço de corte e tem seu uso predominante na operação de fresamento. A Figura 19 demonstra as direções das penetrações de corte a_p e a_e . (DINIZ *et al.*, 2014).

De acordo com Garcia (2019), em um fresamento com inserto intercambiável, pode-se estimar os valores de penetração da ferramenta em relação ao raio da ponta da ferramenta, aplicando-se um valor máximo 50% acima do valor do raio da ponta do inserto e um valor mínimo 50% abaixo do valor do raio da ponta, em milímetros. Tem-se, como exemplo, o caso de o raio da ponta do inserto ter 0,4 mm, em que se utilizaria valor mínimo de penetração de 0,2 mm e máximo de 0,6 mm.

Figura 19 – Penetração da ferramenta



Fonte: Diniz *et al.* (2014, p. 22).

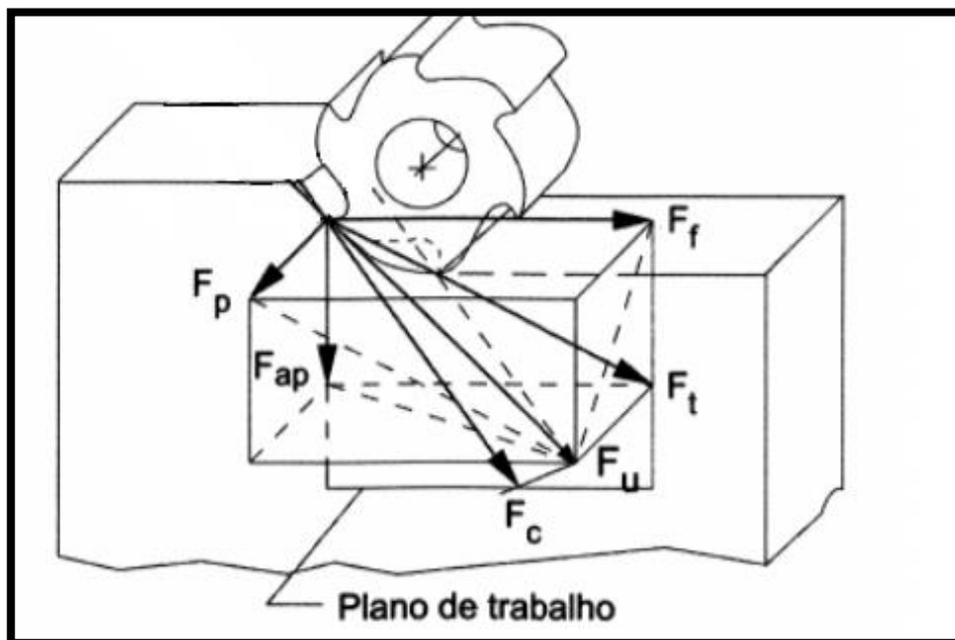
2.8.4 Força e potência de corte

É de fundamental importância o conhecimento de grandeza dos esforços de corte aplicados aos processos de usinagem pois esses dados afetam diretamente o tipo de equipamento a ser utilizado e a capacidade de obtenção de um processo

estável. De acordo com Diniz *et al.* (2014), existem duas principais abordagens no estudo de esforços de corte, sendo elas: a teórica, que basicamente parte dos fenômenos de formação de cavaco e algumas simplificações, como assumir que o corte é ortogonal, ou seja, com componentes de força em somente em duas direções; e a empírica, em que os esforços de corte são equacionados e os coeficientes são extraídos a partir de experimentos.

Conforme demonstrado na Figura 20, a força total resultante que atua sobre a cunha de corte durante o processo é chamada força de usinagem (F_u). Essa força é decomposta em um componente que atua no plano de trabalho chamado força ativa (F_t) e em outro componente perpendicular ao plano de trabalho chamado força passiva (F_p). A força de corte (F_c) é a projeção da F_u sobre a direção de corte. A força de apoio (F_{ap}) é a projeção de F_u sobre a direção perpendicular de avanço. (DINIZ *et al.*, 2014).

Figura 20 – Forças de corte



Fonte: adaptada de Diniz *et al.* (2014, p. 59).

Segundo Diniz *et al.* (2014), a potência de corte pode ser estabelecida pela seguinte relação:

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60 \cdot 10^3} \text{ (kW)} \quad (5)$$

2.9 Superfícies usinadas e rugosidade

Um aspecto que pode ser altamente recomendado para avaliar o processo de usinagem é a condição final da superfície, considerando que esse processo envolve muitos fatores, como deformação plástica, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e, certas vezes, reações químicas (MACHADO *et al.*, 2015).

A superfície de uma peça usinada é composta de irregularidades que resultam do processo de corte, das marcas de avanço, da aresta postiça, do desgaste da ferramenta, dentre outros, que são fatores altamente relevantes em se tratando de rugosidade de superfície. A rugosidade pode ser um fator muito bem utilizado como parâmetro de saída, a fim de controlar um processo de usinagem. Para cada tipo de aplicação podem ser determinados diferentes tipos de rugosidade, por exemplo: para a superfície de mancais, é de extrema importância que sejam fabricados com baixa rugosidade, ou outras superfícies que sirvam de escoamentos de fluidos e gases, que também necessitam de uma rugosidade específica (MACHADO *et al.*, 2015). A Figura 21 demonstra de maneira esquemática os elementos que representam o acabamento.

Figura 21 – Elementos que representam o acabamento



Fonte: Machado *et al.* (2015, p. 310).

A rugosidade pode ser afetada por diversas variáveis, como o tipo de operação, a rigidez da máquina, o tipo de ferramenta utilizado, entre outras. Assim, ela pode ser avaliada por diversos parâmetros. Esses podem ser classificados em: parâmetros de amplitude, que são determinados pelas alturas dos picos e pela profundidade dos

vales sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície; parâmetros de espaço, que são determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície; e parâmetros híbridos, que são determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e de espaço (MACHADO *et al.*, 2015). A Tabela 2 mostra os principais parâmetros de rugosidade utilizados.

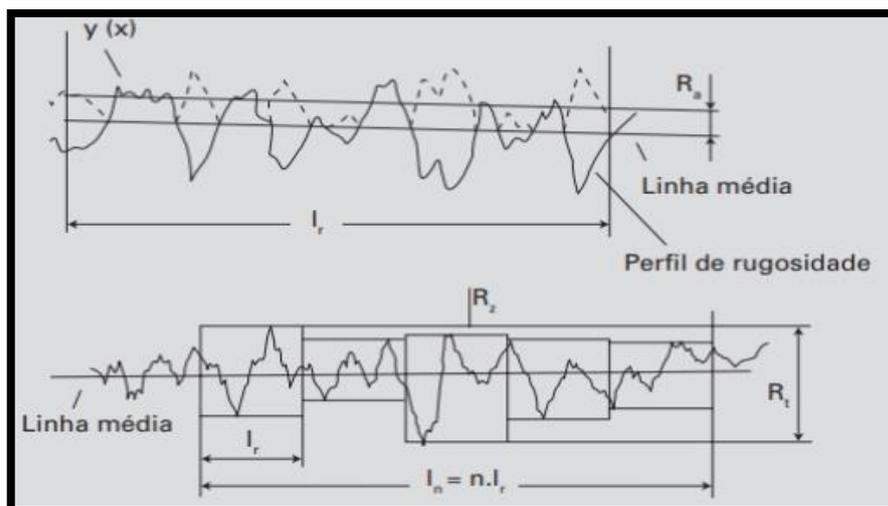
Tabela 2 – Parâmetros de rugosidade

| Símbolo | Nome | Definição |
|----------|--|---|
| R_a | Desvio aritmético médio | Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem |
| R_q | Desvio médio quadrático | Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem |
| R_t | Altura total | Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de amostragem |
| R_z | Altura máxima do perfil | Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem |
| R_{sk} | Fator de assimetria do perfil (Skewness) | Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e R_q ao cubo, no comprimento de amostragem |
| R_{ku} | Fator de achatamento de perfil | Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor de R_q à quarta potência no comprimento de amostragem |

Fonte: Machado *et al.* (2015, p. 313).

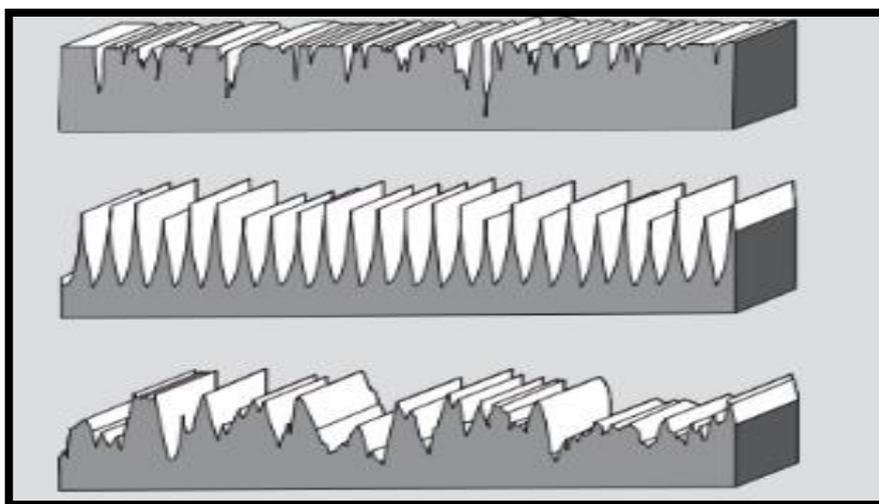
A Figura 22 demonstra como são detectados os tipos de parâmetros de rugosidade.

Figura 22 – Parâmetros de rugosidade



Fonte: Machado *et al.* (2015, p. 313).

Machado *et al.* (2015) afirmam que o R_a é um parâmetro muito utilizado como controle de processos, levando-se em consideração que alterações no seu valor apresentam alterações no processo, em especial o desgaste da ferramenta, e que está disponível em instrumentos mais simples. Por representar um valor médio, torna-se um parâmetro estável, ou seja, não recebe influência de efeitos ocasionais. Contudo, mesmo parecendo um parâmetro muito vantajoso, o R_a , em alguns tipos de aplicações, não é suficiente, pois superfícies geometricamente diferentes podem apresentar seus valores bem próximos, conforme demonstra a Figura 23.

Figura 23 – Superfícies geometricamente diferentes e com mesmo valor de R_a 

Fonte: Machado *et al.* (2015, p. 314).

O parâmetro R_q tem como objetivo ampliar os valores dos picos e vales isolados ou esporádicos, com o intuito de demonstrar defeitos ou marcas em superfícies bem-acabadas – espelhos e lentes, por exemplo. Quando for desejável especificar a altura máxima da rugosidade, devem ser utilizados os parâmetros R_t ou R_z , pois esses são altamente influenciados por qualquer defeito ou irregularidade da superfície. Outras formas de calcular a rugosidade são os valores de Skewness (R_{sk}) e de Kurtosis (R_{ku}), sendo que o primeiro representa a assimetria do perfil e o segundo seu achatamento (MACHADO *et al.*, 2015).

2.10 Formação de cavaco

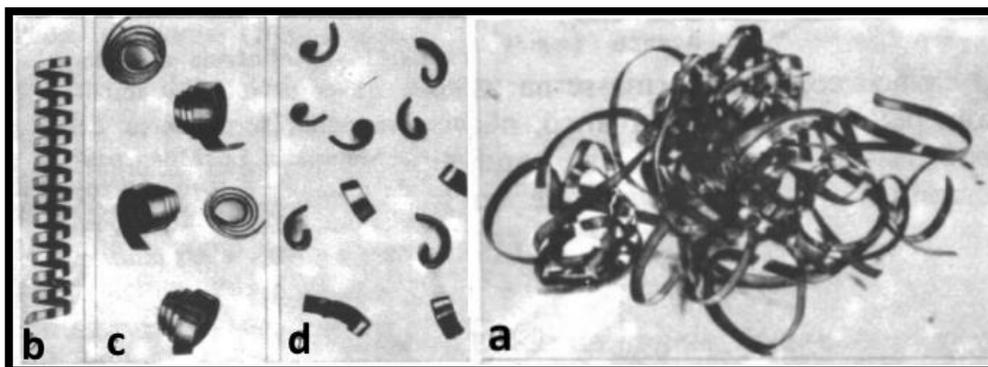
A formação do cavaco nos processos normais de usinagem geralmente resulta da penetração da ferramenta na peça. Nisso, uma pequena porção do material é recalçada contra a superfície de saída da ferramenta, sofrendo deformação plástica progressiva até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientes para iniciar o deslizamento entre essa porção de material reprimida e a peça usinada. Esse deslizamento ocorre nos planos de deslizamento dos cristais do material recalçado, criando uma região de cisalhamento entre o cavaco e a peça (MACHADO *et al.*, 2009; VALIM *et al.*, 2018).

Existem diferentes tipos de cavacos, cada um caracterizado de forma fenomenológica. O cavaco contínuo é predominante em materiais dúcteis, caracterizando-se pela deformação estrutural uniforme do material do cavaco. Requer um material com suficiente deformabilidade, com um grau de deformação do plano de cisalhamento superior ao limite de ruptura. Aumentar as velocidades de corte amplia a formação de fitas contínuas em materiais com essas propriedades. Fatores como baixos coeficientes de atrito entre a ferramenta de corte e o cavaco e o ângulo de saída também contribuem para a formação de cavacos contínuos (SILVA, 2018).

Outro tipo é o cavaco lamelar, que possui uma forma semi-contínua, assemelhando-se a uma serra. Esse tipo de cavaco se forma devido às tensões cíclicas de cisalhamento, alternando entre alta e baixa. A formação do cavaco lamelar é influenciada pela condição de flexão e requer que o material seja deformável o suficiente, com um limite de escoamento de fratura e um ponto de fragmentação do material usinado bem definidos (SILVA, 2018).

A Figura 24 demonstra as principais formas do cavaco.

Figura 24 – Principais formas do cavaco



Fonte: Diniz *et al.* (2013, p. 45).

Por outro lado, o cavaco segmentado ocorre quando as tensões na zona de deslizamento são superiores à deformabilidade do material, levando ao descolamento do material e à formação desses cavacos. Este tipo está associado a materiais mais duros, como ligas de titânio, superligas à base de níquel e aços austeníticos, bem como a velocidades de corte muito baixas (SILVA, 2018).

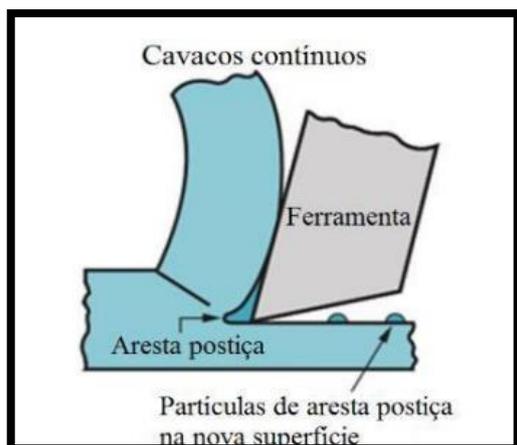
Já o cavaco descontínuo difere dos outros tipos pois não há deformação plástica antes da fratura. Esse tipo de cavaco é comum em operações com materiais altamente frágeis, como titânio, alumínio, ferro fundido e pedra. Fatores como alto atrito entre a ferramenta e o cavaco, avanços altos e profundidade de corte tendem a favorecer a formação desse tipo de cavaco (SILVA, 2018).

Os cavacos contínuos são frequentemente formados devido à ação de arestas postiças. Utilizam-se materiais dúcteis em processos de usinagem, com baixas velocidades de corte, o que promove grande atrito entre a ferramenta e o cavaco, resultando em aderência do material da peça usinada na superfície da ferramenta de corte. Com a sucessão da aderência do material à aresta postiça, ocorre posteriormente a quebra dessa aresta, agregando alguns pedaços do material na superfície da peça usinada (SILVA, 2018).

A compreensão e o controle eficazes da formação de cavacos são vitais para otimizar os processos de usinagem, garantindo maior eficiência, qualidade das peças e segurança operacional (MACHADO *et al.*, 2009; VALIM *et al.*, 2018; SILVA, 2018).

A Figura 25 ilustra o deslocamento de material da aresta postiça.

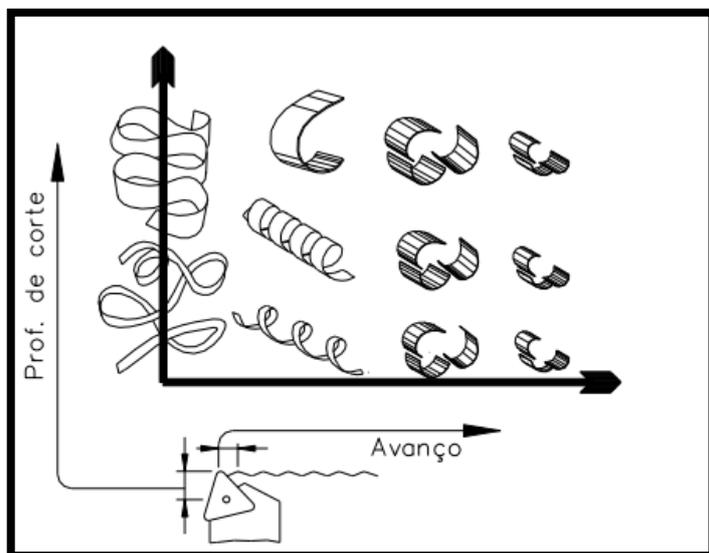
Figura 25 - Deslocamento de material da aresta postiça



Fonte: Silva (2018, p. 39).

Segundo Coelho e Silva (2018), quando se trata dos parâmetros de corte, é observável que, de modo geral, ajustes como o incremento na velocidade de corte, a diminuição do avanço ou o aumento do ângulo de saída tendem a influenciar a transição das formas, ocasionando a geração de cavacos em formato de fita ou contínuos. Dentre essas variáveis, o avanço se destaca como o fator mais influente, seguido de perto pela profundidade de corte, ambos exercendo impacto sobre a conformação do cavaco. A Figura 26 fornece uma representação visual de como as formas dos cavacos são modificadas em relação ao avanço e à profundidade de corte.

Figura 26 – Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos



Fonte: Coelho e Silva (2018, p. 18).

Os cavacos mais extensos apresentam desafios substanciais em termos de segurança e eficiência produtiva, exigindo uma abordagem meticulosa e uma atenção especial ao controle. Apesar da possibilidade de ajustar os parâmetros de corte para prevenir ou minimizar a formação de cavacos contínuos, a estratégia mais eficaz para obter cavacos curtos reside na adoção de quebra-cavacos (COELHO; SILVA, 2018).

2.11 Box-Behnken Design (BBD)

De acordo com Montgomery (2013), quando nos deparamos com problemas em que uma resposta de interesse é influenciada por diversas variáveis e em que o objetivo é otimizar tal resposta, uma forma adequada para resolver tais análises é a metodologia de superfície de resposta. O autor menciona, como exemplo desses problemas, o caso de um engenheiro químico que deseja encontrar os níveis de temperatura e pressão que forneçam o melhor rendimento para um processo, em que o rendimento deste processo é uma função entre essas variáveis.

Foi proposto por Box e Behnken, em 1960, alguns projetos de três níveis, com o objetivo de ajustar a superfície de respostas, esses projetos são formados pela combinação de 2^k fatorial com delineamento de blocos incompletos. Esses experimentos não contêm pontos nos vértices da região cúbica, isso o torna vantajoso quando os pontos nos cantos do cubo representam combinações que muitas vezes podem ser perigosas ou muito caras de serem executadas, como por exemplo em algum teste de caldeira onde são aplicadas elevadas temperatura e pressão, pois os vértices indicam utilização de combinações de parâmetros máximos (MONTGOMERY, 2013). A Tabela 3 mostra o experimento Box-Behnken de três fatores (X_1 , X_2 , X_3), em 3 níveis cada um, sendo eles máximo, central e mínimo (1, 0, -1).

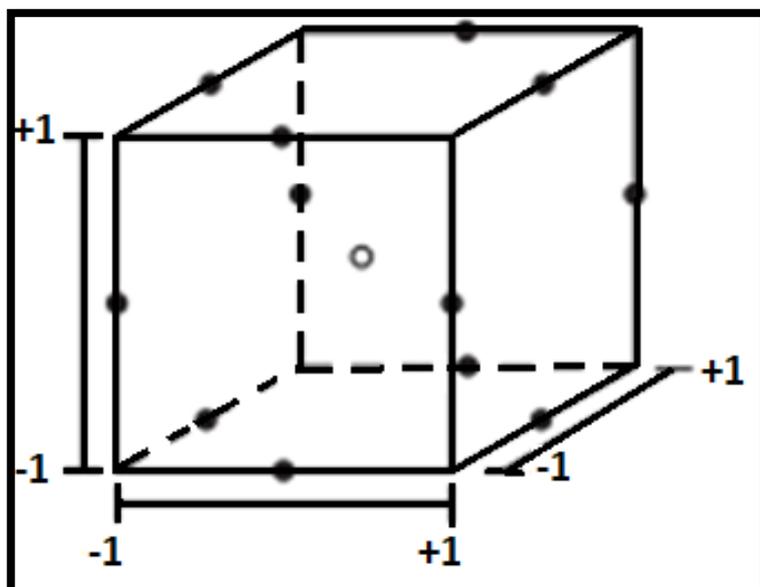
Tabela 3 – Delineamento Experimental Box-Behnken

| Amostras | Fatores controláveis | | |
|----------|----------------------|----|----|
| | X1 | X2 | X3 |
| 1 | -1 | -1 | 0 |
| 2 | -1 | 1 | 0 |
| 3 | 1 | -1 | 0 |
| 4 | 1 | 1 | 0 |
| 5 | -1 | 0 | -1 |
| 6 | -1 | 0 | 1 |
| 7 | 1 | 0 | -1 |
| 8 | 1 | 0 | 1 |
| 9 | 0 | -1 | -1 |
| 10 | 0 | -1 | 1 |
| 11 | 0 | 1 | -1 |
| 12 | 0 | 1 | 1 |
| 13 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: Adaptada de Montgomery (2013).

Esse delineamento também é mostrado geometricamente na Figura 27.

Figura 27 – Cubo de Delineamento Experimental Box-Behnken



Fonte: Montgomery (2013, p. 504)

Segundo Hackenhaar (2016), o uso dos projetos de experimento auxilia na estruturação da sequência dos ensaios, pois facilita o entendimento dos objetivos pré-

estabelecidos e a máxima produção de informações, com uma diminuição nos gastos de recursos e tempo. Isso porque tais experimentos baseiam-se em conceitos estatísticos com a finalidade de otimizar o planejamento.

2.12 Análise de Variância (ANOVA)

De acordo com Feix (2019), para o uso do BBD são utilizadas ferramentas estatísticas como a análise de variância (ANOVA) com objetivo de avaliar a relevância de algum fator. Utiliza-se, também, o gráfico de Pareto para uma melhor visualização dos resultados do experimento.

A Análise de Variância (ANOVA) desempenha um papel crucial na análise estatística ao possibilitar a avaliação da variação em um conjunto de dados e a identificação de fatores que influenciam uma variável de resposta. O valor de p , obtido por meio da ANOVA, é fundamental para determinar a significância estatística desses fatores. Quando o valor de p é inferior a um nível de significância predefinido, como 0,05, podemos rejeitar a hipótese nula, indicando a presença de efeitos significativos (FEIX, 2019; MINITAB, 2023).

Além disso, o Coeficiente de Determinação (R^2) assume uma posição crucial na avaliação do quanto o modelo estatístico explica a variação na variável de interesse. Um R^2 mais elevado indica que uma porção maior da variabilidade é explicada pelos preditores do modelo, fortalecendo a confiança na capacidade do modelo de ajustar-se aos dados observados. Em conjunto, a ANOVA, o valor de p e o R^2 oferecem uma compreensão abrangente da validade e eficácia de um modelo estatístico na interpretação e previsão de fenômenos em estudo (FEIX, 2019; MINITAB, 2023).

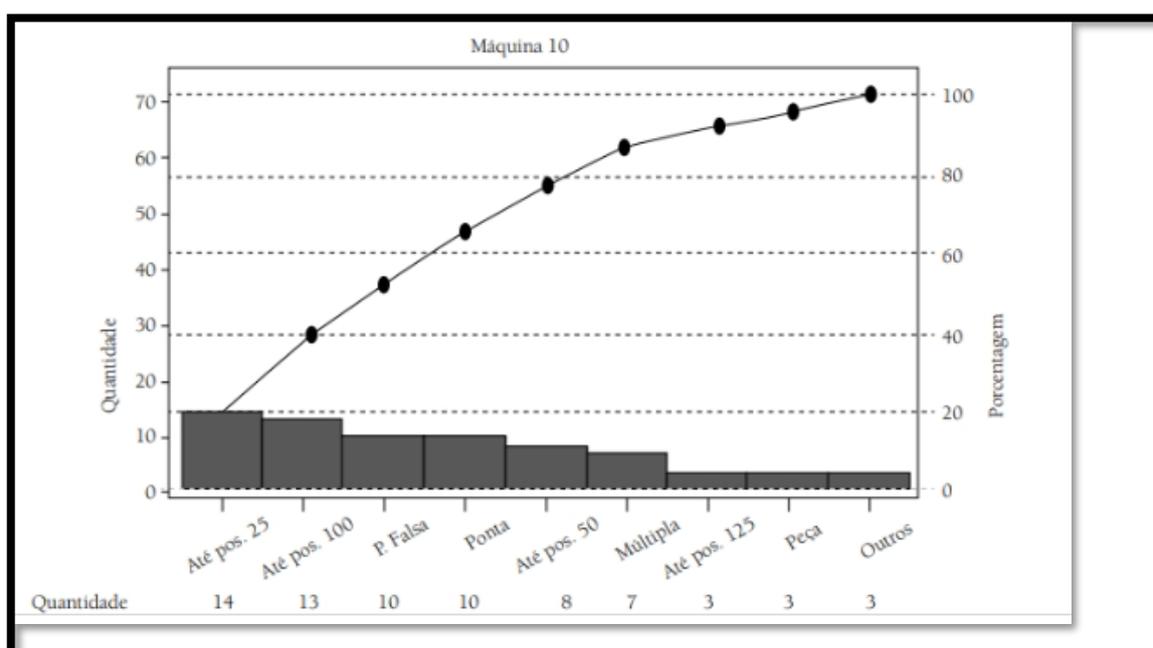
2.13 Gráfico de Pareto

Lobo (2020) define Diagrama de Pareto como um gráfico de barras que busca classificar os dados de um problema e os coloca em ordem de importância. O diagrama de Pareto baseia-se no Princípio 80/20, que quer dizer que 80% dos problemas são gerados por 20% das causas, ou seja, grande parte dos problemas são gerados a partir de pequenas causas. O gráfico de Pareto é um diagrama de

barras que classifica os dados de um problema em ordem de importância, conforme Figura 28.

O gráfico de Pareto se utiliza para comparar a importância e significância estatística dos efeitos principais, quadrados e de interação em um modelo estatístico. O gráfico exibe os efeitos padronizados em ordem decrescente de magnitude, com uma linha de referência para indicar a significância dos efeitos, utilizando um nível de significância de 0,05 (MINITAB, 2023).

Figura 28 – Gráfico de Pareto



Fonte: Lobo (2020, p. 53).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este estudo baseia-se na busca da melhor condição de usinagem, com a aplicação de análise comparativa durante o processo de fresagem frontal do aço SAE 4140, com parâmetros de usinagem e insertos distintos. Neste capítulo, serão apresentados os procedimentos metodológicos para a realização deste estudo. As etapas deste trabalho serão realizadas da seguinte forma: (I) configuração do corpo de prova; (II) caracterização da máquina-ferramenta e ferramentas de corte; (III) lubrificação de corte utilizada; (IV) planejamento experimental; (V) medição de rugosidade; (VI) análise de cavacos; e (VII) análise do desgaste das ferramentas de corte.

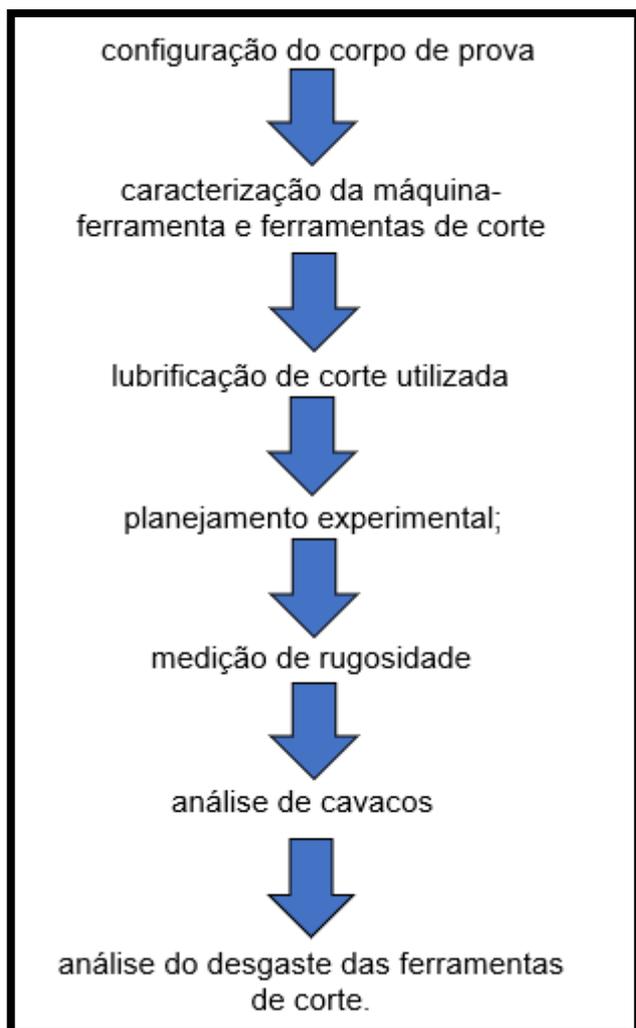
3.1 Classificação da pesquisa

Este trabalho pode ser categorizado, em termos de metodologia, como uma análise quantitativa. Dentro dessa abordagem exploratória, serão examinados dados quantitativos relacionados aos parâmetros de fresamento.

O método de pesquisa foi delineado para explorar os parâmetros de entrada empregados durante o processo de fresamento e compará-los com os resultados obtidos posteriormente. Este estudo foi realizado em uma empresa metalúrgica sediada em Imigrante, no estado do Rio Grande do Sul

O procedimento metodológico, com a aplicação do método BBD, se dará pelas seguintes etapas, dispostas na Figura 29.

Figura 29 – Fluxograma do procedimento metodológico



Fonte: Do autor (2023).

3.2 Configuração do corpo de prova

Para o presente estudo, foram utilizados corpos de prova cilíndricos de aço SAE 4140, a partir de um material em barra laminada redonda, em bruto de laminação, sem tratamento térmico. A Tabela 4 apresenta os principais elementos da composição química do aço SAE 4140, utilizado neste estudo. Este material foi escolhido devido a sua alta utilização na empresa JA Industrial, onde se realizou o estudo.

Tabela 4 – Composição principais elemento químicos do aço SAE 4140

| Elemento | | C | Mn | p | Si | S | Cr | Mo |
|----------------|----------------|-------|------|--------|------|--------|------|------|
| Quantidade (%) | ASTM A29 | 0,38 | 0,75 | | 0,15 | | 0,8 | 0,15 |
| | | 0,43 | 1 | ≤0,035 | 0,35 | ≤0,040 | 1,1 | 0,25 |
| | Laudo Gerdau | 0,426 | 0,8 | 0,014 | 0,25 | 0,008 | 0,94 | 0,16 |
| | Medido (média) | 0,4 | 0,77 | 0,018 | 0,27 | 0,008 | 0,94 | 0,17 |

Fonte: Do autor (2023).

Os documentos que basearam a elaboração dessa tabela encontram-se nos anexos deste trabalho. O Anexo A mostra o certificado de composição química da fabricante Gerdau, referente à matéria prima utilizada para a realização deste estudo. O Anexo B apresenta os resultados da composição química do material, medidos por meio de um espectrômetro de emissão óptica, da marca Shimadzu, modelo PDA-7000, disposto na Figura 30, que está localizado no laboratório da empresa Hassmann S.A., cliente da empresa JA Industrial.

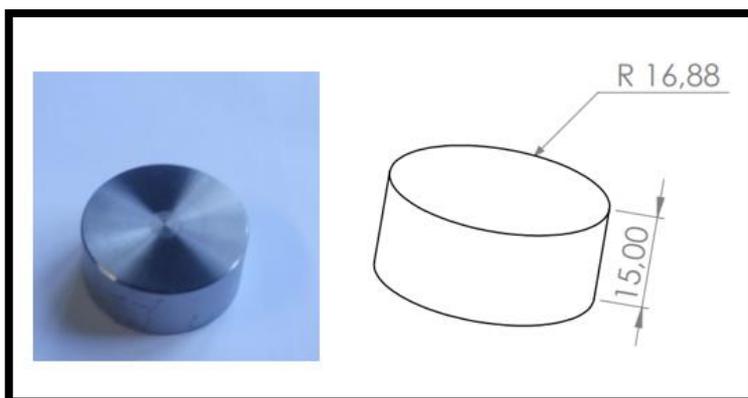
Figura 30 – Espectrômetro Shimadzu PDA-7000



Fonte: Do autor (2023).

Os corpos de prova foram previamente cortados e faceados em torno mecânico, conforme pode ser visualizado na Figura 31, a fim de eliminar qualquer irregularidade que pudesse prejudicar a análise do estudo.

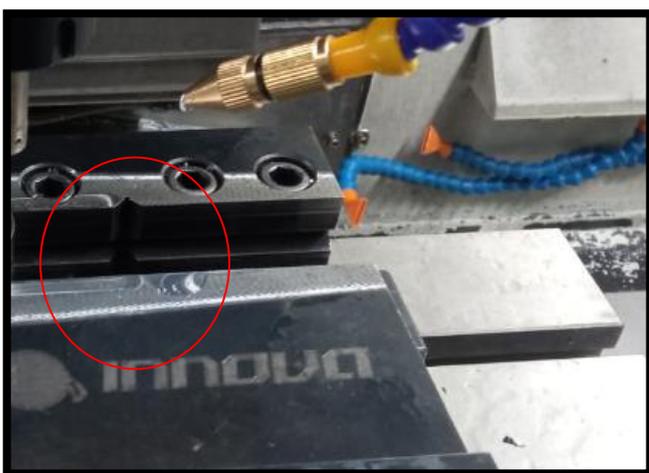
Figura 31 – Corpo de prova pré-usinado



Fonte: Do autor (2023).

Os corpos de prova foram dimensionados e fixados à máquina com o auxílio de uma moça tipo hidráulica, equipada com um mordente com rasgo triangular para fixação em 3 pontos (conforme Figura 32), dessa forma pudessem estar em condição rígida, para que as únicas folgas sejam oriundas da flexibilidade do conjunto composto pela ferramenta, porta-ferramenta e eixo-árvore, para garantir uma usinagem com o mínimo de vibração.

Figura 32 – Fixação do corpo de prova



Fonte: Do autor (2023).

Foi utilizado um durômetro da marca Mitutoyo, modelo Durotwin, disposto na Figura 33, para medir a dureza do material. Foram realizadas três medições na amostra para garantir que a dureza estivesse dentro da faixa especificada de 30 a 31 HRC.

Figura 33 – Durômetro Mitutoyo Durotwin



Fonte: Do autor (2023).

3.3 Caracterização da máquina-ferramenta e ferramentas de corte utilizadas

A máquina utilizada para realizar a usinagem dos experimentos foi um centro de usinagem vertical Akira Seiki, modelo Sr3 Xp, que se encontra na linha de produção da empresa JA industrial. As características da máquina mais relevantes ao processo são: mesa de trabalho com dimensões de 910x380mm, curso de eixos X, Y e Z respectivamente 550x430x460mm, velocidade de deslocamento de eixos X, Y e Z respectivamente 36x36x30m/min, rotação máxima do eixo árvore de 11.000 RPM, potência do motor do spindle de 7,5 HP. A Figura 34 ilustra a máquina caracterizada.

Figura 34 – Centro de usinagem Akira Seiki modelo Sr3 Xp

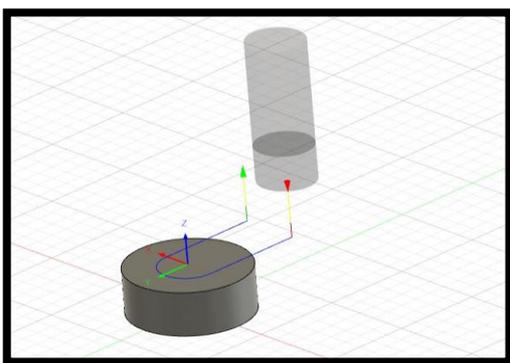


Fonte: Bener (2023, figura digital).

O corpo de prova com raio de 16,88 mm foi fixado à máquina usando uma morsa de precisão para fresadora. O percurso que a ferramenta de corte percorreu durante o processo de usinagem é detalhado na Figura 35, foi utilizado um cabeçote de fresamento com diâmetro de 16mm, por se tratar de um cabeçote de fresamento com diâmetro menor do que o corpo de prova ele adentra completamente a superfície da peça onde se encontra a região de estabilidade de corte. A programação CNC utilizada foi gerada a partir do software Fusion 360 e está disponível no Anexo D.

Foi definido utilizar este caminho da ferramenta de corte, por se tratar de um processo utilizado na empresa onde foi desenvolvido o estudo.

Figura 35 – Caminho da ferramenta de corte



Fonte: Do autor (2023).

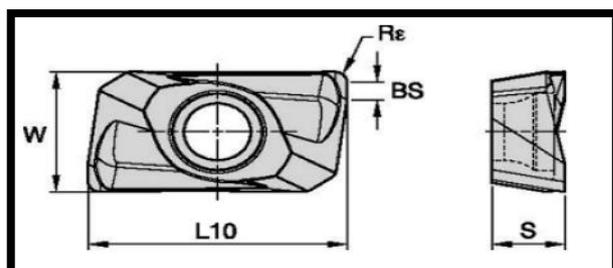
A ferramenta de corte utilizada foi um cabeçote intercambiável APMT11 (d16x150l) - Ws, com dimensões de 16 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento, conforme Figura 36, com a utilização do inserto do tipo APMT 1135pdr do fabricante Kennametal, com raio ($R\epsilon$) de 0,8 mm, espessura (S) de 3,5mm, comprimento de borda de corte (L10) de 11,2mm, comprimento da faceta de canto (BS) de 1,38 mm, conforme Figura 37.

Figura 36 – Cabeçote tipo APMT 11 (d16x150l) - Ws



Fonte: Do autor (2023).

Figura 37 – Caracterização do inserto



Fonte: Widia (2023, figura digital).

A verificação do batimento radial foi verificada com um relógio apalpador Mitutoyo, modelo 513-405-10E, com resolução de 2 μm , com exatidão de $\pm 3 \mu\text{m}$, fixado por uma base magnética, apresentado na Figura 38. Os valores obtidos foram de aproximadamente 15 μm . O valor encontrado está em conformidade com a norma ABNT NBR 6409/1997, que especifica que o batimento radial deve ser abaixo de 40 μm .

Figura 38 – Verificação do batimento radial da ferramenta de corte

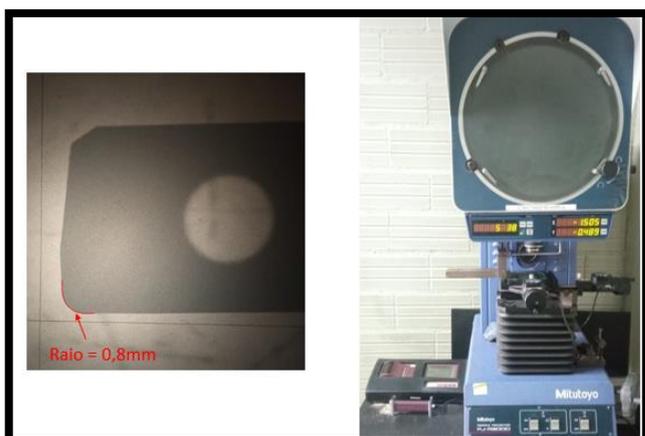


Fonte: Do autor (2023).

Foi realizada a verificação do raio da ponta da ferramenta de corte com a utilização de um projetor de perfis modelo PJ-A3000 da marca Mitutoyo, conforme disposto na Figura 39.

Este equipamento é periodicamente calibrado, com sua última aferição realizada no dia 6 de novembro de 2023, o certificado de calibração encontra-se no Anexo F.

Figura 39 – Verificação do raio da ponta da ferramenta de corte



Fonte: Do autor (2023).

3.4 Lubrificação de corte utilizada

Durante o processo de usinagem, foi utilizado o óleo Quimatic Jet, do fabricante Quimatic, mostrado na Figura 40. O Boletim Técnico do óleo Quimatic JET está disponível no Anexo C.

Figura 40 – Óleo Quimatic Jet



Fonte: Do autor (2023).

A forma de aplicação desse óleo foi por mínima quantidade de fluido (MQF), em que foi aplicado por spray de ar comprimido com pressão de 3 bar, com quantidade de fluido de aproximadamente 200ml/h. O dispositivo foi fixado à máquina em posição em que lançasse o spray diretamente na área de corte com uma angulação de 25 graus, de acordo com o apresentado na Figura 41.

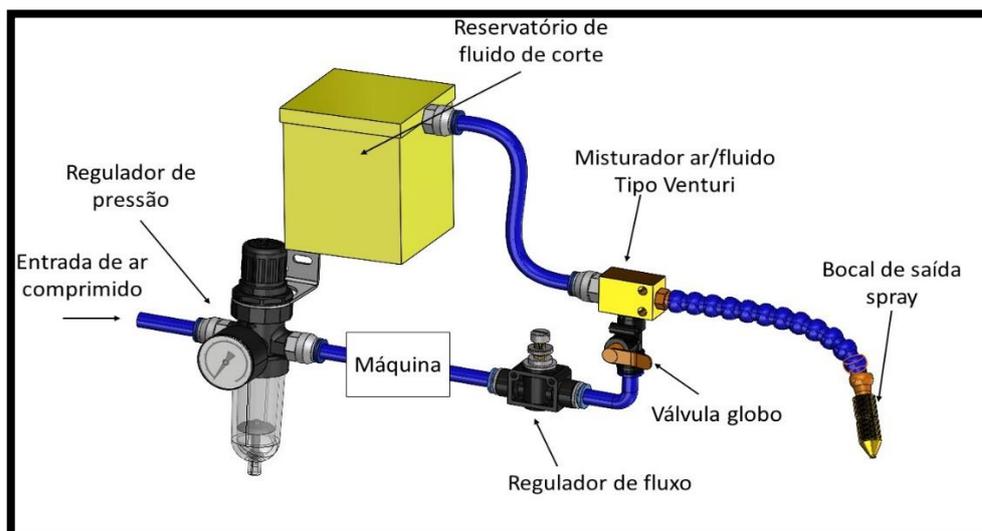
Figura 41 – Aplicação de lubrificação por spray (MQF)



Fonte: Do autor (2023).

A Figura 42 demonstra o sistema esquemático de lubrificação por MQF utilizado.

Figura 42 – Desenho esquemático do sistema de lubrificação por MQF utilizado



Fonte: Do autor (2023).

3.5 Medição de rugosidade

Neste trabalho, optou-se por medir a rugosidade utilizando o parâmetro Ra, amplamente adotado devido à sua relevância. A medição foi realizada ao longo de um comprimento de 4 milímetros, com um *cut-off* de 0,8 milímetros, em conformidade com a norma ABNT NBR 4288/2008.

Foram realizadas três medições de rugosidade em cada corpo de prova, na região estável de corte.

Para capturar e gerar os perfis de rugosidade, utilizou-se o rugosímetro Mitutoyo, modelo Surftest SJ 301. Esse aparelho possui uma resolução de 0,5 μm e permite a medição a velocidades variando de 0,25 mm/s a 0,5 mm/s, com um retorno de 1 mm/s. Além disso, utiliza uma ponta de medição de diamante com raio de 5 μm e aplica uma força de medição de 4 mN.

Os valores das amplitudes de rugosidade foram obtidos a partir do rugosímetro e armazenados em um cartão de memória do tipo *compact flash*. Posteriormente, esses valores foram utilizados para gerar os perfis de rugosidade com a ajuda do software Excel. A Figura 43 exibe o rugosímetro utilizado.

Este equipamento é periodicamente calibrado, com sua última aferição realizada no dia 6 de novembro de 2023, conforme certificado de calibração que se encontra no Anexo E.

Figura 43 – Rugosímetro Mitutoyo modelo Surftest SJ 301



Fonte: Do autor (2023).

3.6 Análise de cavacos

Os cavacos foram coletados e avaliados com auxílio de imagens geradas no microscópio digital da marca MW, modelo 1600x, que possui aumento de até 1600x e resolução de 1024x768 pixels. O equipamento, disponível na empresa JÁ Industrial, foi fixado em um ajustador de altura, buscando diferenciar sua morfologia, relativa a cada variação de parâmetros de processo, conforme Figura 44.

A geometria do cavaco pode revelar importantes informações sobre a qualidade do processo de usinagem, principalmente se os parâmetros de corte, como avanço (f_z), velocidade de corte (V_c) e profundidade de corte (A_p), estiverem adequados. Se utilizados de forma inadequada, esses parâmetros podem ocasionar um desgaste prematuro das ferramentas de corte.

Figura 44 – Microscópio digital



Fonte: Do autor (2023).

3.7 Planejamento estatístico experimental

Para realizar o experimento, inicialmente fez-se a modelagem utilizando o método BBD com o auxílio do software Minitab® 19, conforme apresentado na Tabela 6. Esse método requer a realização de 15 amostras para cada estudo, com a utilização de 3 fatores, sendo que cada fator é avaliado em 3 níveis. Os fatores analisados foram avanço (f_z), velocidade de corte (V_c) e profundidade de corte (A_p), cada um variando em seus respectivos níveis mínimos, médios e máximos. O objetivo principal é descobrir a melhor combinação entre esses parâmetros de corte, juntamente com o

tipo de lubrificação utilizado. Para alcançar isso, foram realizados dois estudos separado, ambos utilizam a mesma modelagem que foi criada com o auxílio do Minitab® 19. No entanto, um desses estudos emprega a técnica MQF, enquanto o outro estudo utiliza a usinagem a seco. Esse processo ajuda a avaliar e comparar os efeitos das diferentes abordagens nas variáveis de interesse, como a rugosidade.

Os parâmetros de usinagem, de acordo com o fabricante das ferramentas de corte, são os seguintes: V_c varia de 80 a 180 m/min e f_z varia de 0,05 a 0,4 mm/dente e o A_p foi determinada com base no raio do inserto ($r_\epsilon = 0,8$ mm), variando 50% acima e 50% abaixo de r_ϵ , resultando em $A_p = 0,4$ a 1,2 mm, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros de usinagem

| Fatores | Símbolo | Unidade | Níveis | | |
|-----------------------|---------|----------|--------|-------|-----|
| | - | - | -1 | 0 | +1 |
| Velocidade de corte | V_c | m/min | 80 | 130 | 180 |
| Avanço por dente | F_z | mm/dente | 0,05 | 0,225 | 0,4 |
| Profundidade de corte | A_p | mm | 0,4 | 0,8 | 1,2 |

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 6 – Aleatorização BBD criada a partir do Minitab®

| Amostras | Fatores controláveis | | |
|----------|----------------------|-------------------|------------|
| | V_c (m/min) | F_z (mm/dente.) | A_p (mm) |
| 1 | 130 | 0,050 | 1,2 |
| 2 | 130 | 0,400 | 0,4 |
| 3 | 180 | 0,225 | 1,2 |
| 4 | 130 | 0,050 | 0,4 |
| 5 | 80 | 0,225 | 0,4 |
| 6 | 130 | 0,225 | 0,8 |
| 7 | 130 | 0,225 | 0,8 |
| 8 | 80 | 0,400 | 0,8 |
| 9 | 80 | 0,225 | 1,2 |
| 10 | 180 | 0,400 | 0,8 |
| 11 | 180 | 0,050 | 0,8 |
| 12 | 180 | 0,225 | 0,4 |
| 13 | 130 | 0,400 | 1,2 |
| 14 | 130 | 0,225 | 0,8 |
| 15 | 80 | 0,050 | 0,8 |

Fonte: Do autor (2023).

Para determinar as influências das variáveis independentes de entrada (V_c , A_p e F_z) na variável dependente de saída, a rugosidade, conduziu-se uma análise de variância (ANOVA). Nessa análise, utilizaram-se os valores médios obtidos em cada teste como base. Um intervalo de confiança de 95% foi adotado, o que implica que valores de alfa (α) inferiores a 5% foram considerados significativos para a variável de controle em questão, indicando uma influência na resposta. Vale ressaltar que valores de “p” mais baixos sugerem uma influência mais forte do parâmetro na resposta obtida.

Para apoiar esse processo, empregou-se o software Minitab® 19 para determinar as equações de regressão, que representam matematicamente o comportamento dos gráficos comparativos entre os valores observados durante o experimento. Além disso, calcularam-se os coeficientes de determinação (R^2 e R^2_{ajust}) para avaliar o grau de ajuste dos modelos aos dados.

Com o intuito de visualizar com maior precisão a influência dos fatores controláveis nas variáveis de resposta em diferentes cenários, geraram-se gráficos de contorno, auxiliando na compreensão das interações entre as variáveis.

Por fim, validou-se o modelo de regressão e determinou-se a combinação ótima dos fatores controláveis. Após foram realizados mais alguns testes para determinar a vida útil dos insertos.

3.8 Análise do desgaste das ferramentas

Com o objetivo de avaliar o desgaste das ferramentas ao comparar o uso de MQL com o corte a seco, foram conduzidas várias operações até que o desgaste se tornou perceptível. Para este teste, foram empregados os valores mais elevados utilizados nos ensaios anteriores para V_c e F_z , mantendo a profundidade de corte (A_p) em um nível intermediário por razões de segurança, evitando possíveis quebras dos insertos. Os dados utilizados estão detalhados na Tabela 7. Utilizando um microscópio, conforme mostrado na Figura 44, foram capturadas imagens do desgaste das ferramentas.

Tabela 7 – Parâmetros de corte utilizados para análise de desgaste de insertos

| Parâmetros de corte | V_c | F_z | A_p |
|----------------------------|-------|-------|-------|
| valores | 180 | 0,4 | 0,8 |

Fonte: Do autor (2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a etapa de coleta de dados, que envolveu a análise das áreas usinadas nas peças e a avaliação dos cavacos resultantes do processo de usinagem, bem como a análise de desgaste de ferramentas de corte, este capítulo se dedica a apresentar e discutir os resultados obtidos a partir dessas análises.

4.1 Análise da rugosidade

A Tabela 8 apresenta os valores médios das rugosidades, especificamente as medidas de R_a . Cada valor na tabela representa a média aritmética das três medições realizadas na superfície de cada amostra usinada.

É importante observar que todas as medições foram conduzidas no centro da superfície de corte de cada amostra. Isso significa que as três medições foram feitas em pontos centrais, garantindo que os valores representados na referida tabela se refiram à área central da superfície de cada amostra. Essa abordagem de medição no centro é importante para a precisão e a consistência dos dados, uma vez que fornece informações representativas sobre as características de rugosidade das amostras usinadas.

Tabela 8 – Resultados dos experimentos em R_a

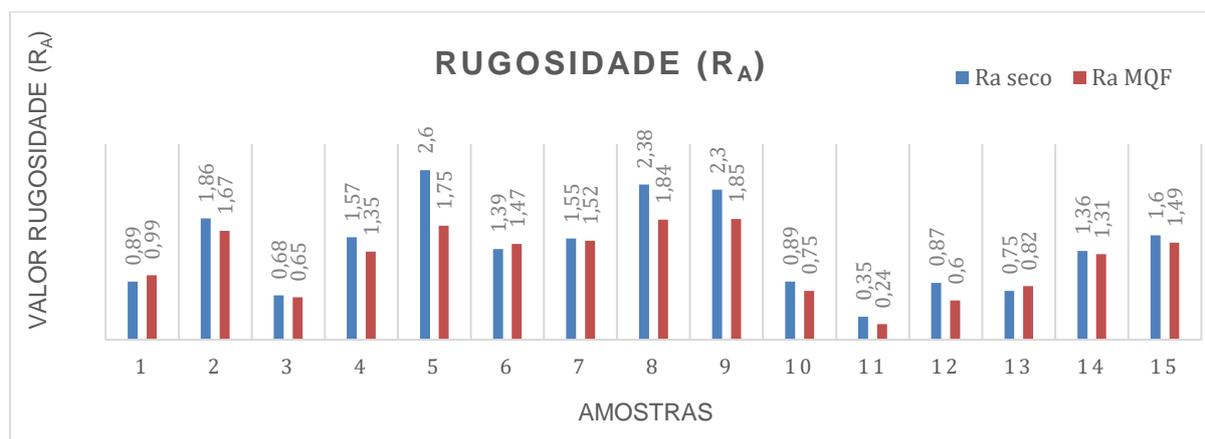
| Amostras | Variáveis de entrada | | | Variáveis resposta | |
|----------|----------------------|--------------|------------|-------------------------|----------------------------------|
| | | | | Fresamento a seco | Fresamento com utilização de MQF |
| | V_c [m/min] | F_z [mm/z] | A_p [mm] | R_a [μm] | R_a [μm] |
| 1 | 130 | 0,050 | 1,2 | 0,89 | 0,99 |
| 2 | 130 | 0,400 | 0,4 | 1,86 | 1,67 |
| 3 | 180 | 0,225 | 1,2 | 0,68 | 0,65 |
| 4 | 130 | 0,050 | 0,4 | 1,57 | 1,35 |
| 5 | 80 | 0,225 | 0,4 | 2,6 | 1,75 |
| 6 | 130 | 0,225 | 0,8 | 1,39 | 1,47 |
| 7 | 130 | 0,225 | 0,8 | 1,55 | 1,52 |
| 8 | 80 | 0,400 | 0,8 | 2,38 | 1,84 |
| 9 | 80 | 0,225 | 1,2 | 2,3 | 1,85 |
| 10 | 180 | 0,400 | 0,8 | 0,89 | 0,75 |
| 11 | 180 | 0,050 | 0,8 | 0,35 | 0,24 |
| 12 | 180 | 0,225 | 0,4 | 0,87 | 0,6 |
| 13 | 130 | 0,400 | 1,2 | 0,75 | 0,82 |
| 14 | 130 | 0,225 | 0,8 | 1,36 | 1,31 |
| 15 | 80 | 0,050 | 0,8 | 1,6 | 1,49 |

Fonte: Do autor (2023).

Conforme demonstrado na Tabela 8, foram conduzidos um total de 15 comparações entre a utilização do MQF e a aplicação a seco. Dessas comparações, em apenas 3 amostras específicas (amostras 1, 6 e 13) foi observado que a rugosidade obtida com a aplicação a seco foi menor do que a rugosidade alcançada com o uso do MQF. Como as diferenças entre os valores são relativamente pequenas, é possível perceber que a técnica do MQF resultou em uma melhoria significativa na qualidade, destacando claramente seus benefícios em comparação com a aplicação a seco.

Para facilitar a visualização dos resultados, o Gráfico 1 compara os valores de rugosidade encontrados nos testes realizados com a técnica MQF e nos testes de usinagem a seco.

Gráfico 1 – Gráfico comparativo dos resultados de medição de rugosidade



Fonte: Do autor (2023).

Ao analisar as variáveis de resposta destacadas na Tabela 8, o objetivo foi comparar os resultados obtidos em duas situações principais de estudo, ou seja, a usinagem MQF e a usinagem a seco. Para realizar essa comparação, foram selecionadas três amostras com os valores mais baixos e três com os valores mais altos de R_a , conforme destacado na Tabela 9, sendo em azul os melhores valores e em vermelho os piores valores de R_a . Essa análise tem como propósito identificar a condição de corte mais favorável, estabelecendo uma relação entre a menor rugosidade encontrada e o perfil do cavaco considerado ideal com base nas referências da literatura. Esse enfoque favorece a determinação de quais configurações de usinagem proporcionam os resultados desejados em termos de rugosidade e perfil do cavaco, auxiliando na otimização do processo.

Tabela 9 – Os três melhores e piores valores de R_a

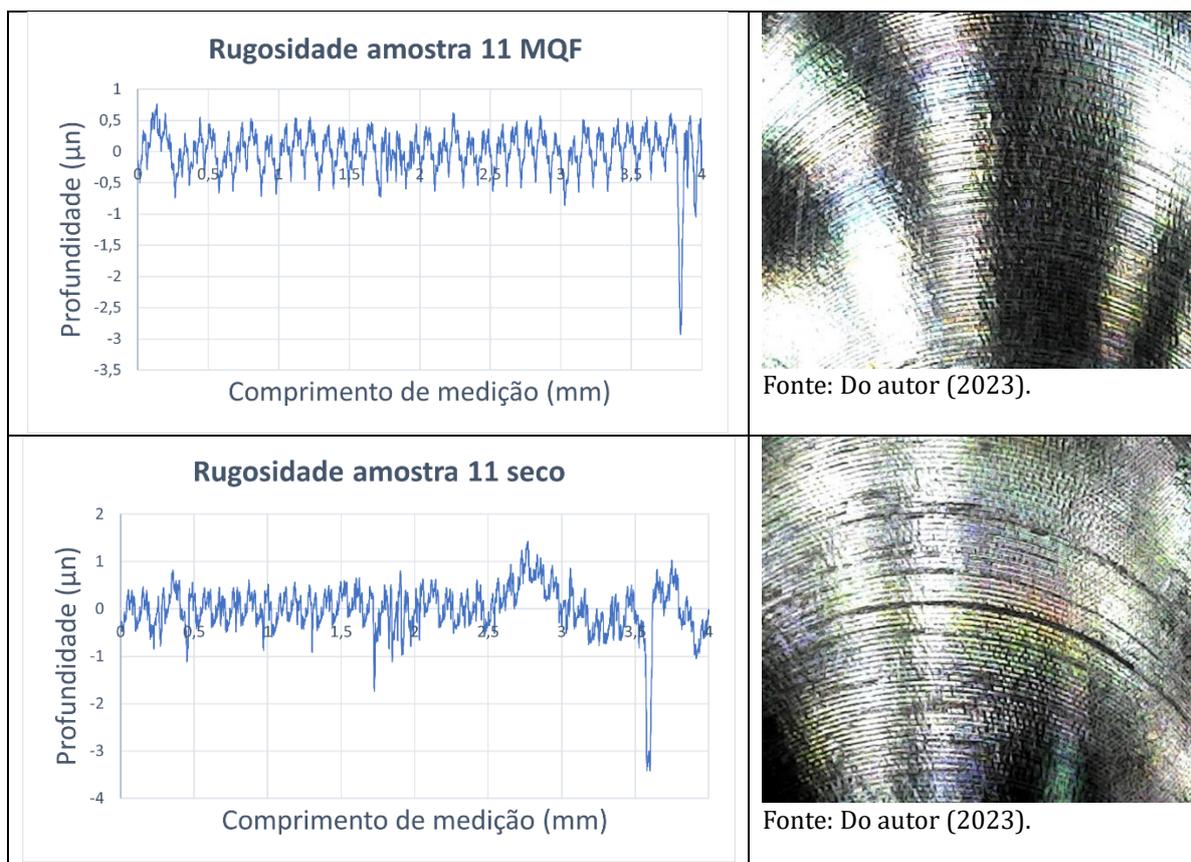
| Amostras | Variáveis de entrada | | | Variáveis resposta | |
|----------|----------------------|--------------|------------|--------------------|----------------------------------|
| | | | | Fresamento a seco | Fresamento com utilização de MQF |
| | V_c [m/min] | F_z [mm/z] | A_p [mm] | R_a [μm] | R_a [μm] |
| 3 | 180 | 0,225 | 1,2 | 0,68 | 0,65 |
| 5 | 80 | 0,225 | 0,4 | 2,6 | 1,75 |
| 8 | 80 | 0,400 | 0,8 | 2,38 | 1,84 |
| 9 | 80 | 0,225 | 1,2 | 2,3 | 1,85 |
| 11 | 180 | 0,050 | 0,8 | 0,35 | 0,24 |
| 12 | 180 | 0,225 | 0,4 | 0,87 | 0,6 |

Fonte: Do autor (2023).

A partir da Tabela 9, é possível perceber que, nas três melhores medições, com menores valores de rugosidade (3, 11, 12), o fator mais significativo para esses resultados foi a velocidade de corte (V_c). Nessas situações, foi utilizado o valor máximo de V_c . Por outro lado, nas três medições com valores de rugosidade mais elevados (5, 8, 9), pode-se notar que foram empregados os valores mínimos de V_c . Isso significa que a velocidade de corte desempenhou um papel fundamental na qualidade das medições, com valores mais altos associados a melhores resultados e valores mais baixos relacionados a resultados menos favoráveis.

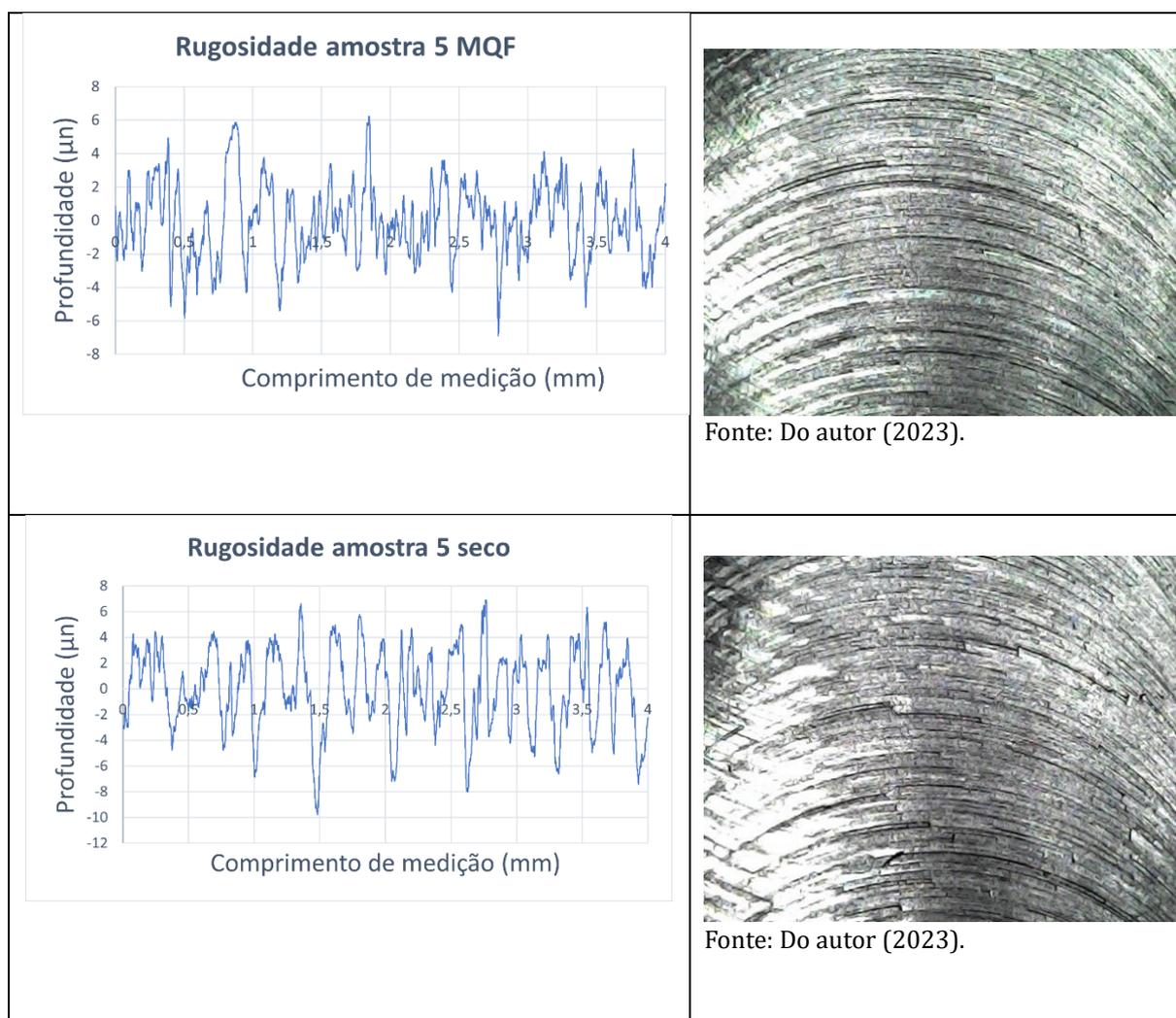
A fim de destacar os resultados, estão dispostos nos Quadros 1 e 2 os perfis de rugosidade e as imagens das superfícies usinadas relativas às amostras que apresentaram menor e maior rugosidade. O Quadro 1 apresenta os perfis de rugosidade e superfície usinada da amostra com menor rugosidade encontrada, enquanto o Quadro 2 exibe os da amostra com maior rugosidade encontrada.

Quadro 1 – Perfis de rugosidade e superfície usinada da amostra com menor rugosidade encontrada.



Fonte: Do autor (2023).

Quadro 2 – Perfis de rugosidade e superfície usinada da amostra com maior rugosidade encontrada.



Fonte: Do autor (2023).

Ao analisar as imagens da superfície usinada, fica evidente que o principal fator responsável pela rugosidade é o V_c , uma vez que foi a partir desta variável que pôde ser observado que os maiores valores de V_c formaram menor valor de rugosidade e os menores valores de V_c formaram maiores valores de rugosidade. Outro elemento a ser considerado é o uso do MQF. Em ambas as amostras, tanto nas que apresentam maiores valores de rugosidade quanto nas de menor, é possível notar uma melhoria no aspecto da superfície usinada quando a técnica MQF é empregada.

Essa melhoria é perceptível visualmente, conforme demonstrado nas imagens da superfície. Ao empregar a técnica de MQF, observou-se uma maior homogeneidade nas linhas de corte, ou seja, menos falhas. Essas falhas podem

ocorrer devido à dificuldade na remoção do cavaco, causada pela falta de lubrificação e pelo aquecimento no corte a seco.

Outro aspecto relevante a ser destacado são os perfis de rugosidade, especialmente na amostra 11, na qual é possível perceber que, ao utilizar o MQF, os perfis se tornaram mais homogêneos em comparação com o corte a seco.

4.2 Análise estatística da rugosidade Ra

Após coletar dados de rugosidade em diferentes corpos de prova, a ANOVA foi aplicada para aprofundar o entendimento de como cada variável independente influencia a rugosidade das peças usinadas, considerando as condições estabelecidas.

Um aspecto essencial no uso da ANOVA é a interpretação do valor-p. Esse valor é comparado com um nível de significância (α), frequentemente estabelecido em 0,05. Este nível representa a probabilidade de erro ao rejeitar a hipótese nula, ou seja, a probabilidade de afirmar uma relação entre variáveis quando na verdade não existe.

Essa abordagem estatística proporciona uma base sólida para a tomada de decisões relacionadas ao processo de usinagem, auxiliando na compreensão e no controle dos fatores que impactam a qualidade final das peças.

Na Tabela 10, a coluna "Prop %" indica a porcentagem de contribuição de cada termo do modelo estatístico em relação à variabilidade total observada. Por outro lado, a coluna "valor-p" indica quais fatores são estatisticamente significativos na resposta, considerando um nível de significância $\alpha \leq 0,05$. Quando o valor-p é inferior ao nível de significância (0,05), isso indica que a associação entre a variável independente e a rugosidade é estatisticamente significativa. Isso permite a conclusão de que a variável em questão (a velocidade de corte) tem uma influência estatisticamente relevante na rugosidade (R_a) das peças.

Tabela 10 – ANOVA para MQF e a seco

| MQF | | | | | | SECO | | | | |
|---|----|-------|-------|---------|--------|---|-------|-------|---------|--------|
| Fator | GL | SQ | QM | Valor-P | Prop% | GL | SQ | QM | Valor-P | Prop% |
| V _c | 1 | 0,531 | 0,531 | 0,034 | 38,8% | 1 | 1,306 | 1,306 | 0,012 | 51,9% |
| F _z | 1 | 0,058 | 0,058 | 0,382 | 4,3% | 1 | 0,094 | 0,094 | 0,353 | 3,7% |
| A _p | 1 | 0,156 | 0,156 | 0,178 | 11,4% | 1 | 0,333 | 0,333 | 0,112 | 13,2% |
| V _c ² | 1 | 0,112 | 0,112 | 0,242 | 8,2% | 1 | 0,043 | 0,043 | 0,519 | 1,7% |
| F _z ² | 1 | 0,119 | 0,119 | 0,231 | 8,7% | 1 | 0,207 | 0,207 | 0,190 | 8,2% |
| A _p ² | 1 | 0,008 | 0,008 | 0,737 | 0,6% | 1 | 0,019 | 0,019 | 0,669 | 0,7% |
| V _c *F _z | 1 | 0,006 | 0,006 | 0,764 | 0,5% | 1 | 0,014 | 0,014 | 0,706 | 0,6% |
| V _c *A _p | 1 | 0,001 | 0,001 | 0,925 | 0,0% | 1 | 0,003 | 0,003 | 0,862 | 0,1% |
| F _z *A _p | 1 | 0,060 | 0,060 | 0,376 | 4,4% | 1 | 0,046 | 0,046 | 0,506 | 1,8% |
| Erro | 5 | 0,318 | 0,064 | | 23,2% | 5 | 0,450 | 0,090 | | 17,9% |
| Total | 14 | 1,370 | | | 100,0% | 14 | 2,515 | | | 100,0% |
| R ² = 91,20 % R ² (aj) = 75,37 % | | | | | | R ² = 92,93 % R ² (aj) = 80,20 % | | | | |

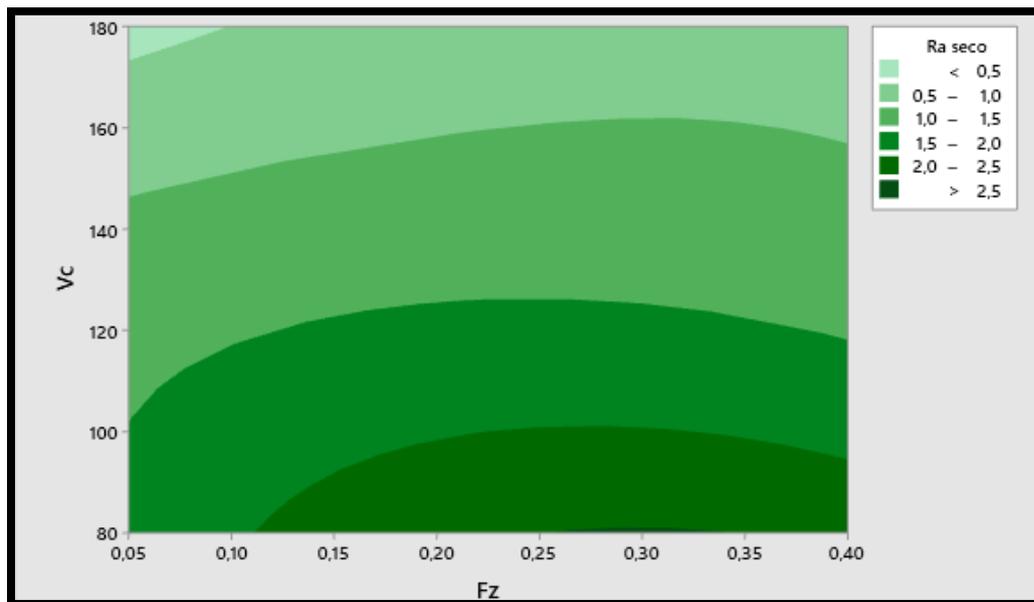
Fonte: Do autor (2023).

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 10, foi observado que, tanto no caso da usinagem utilizando o método MQF quanto no processo a seco, a influência da velocidade de corte mostrou-se estatisticamente mais significativa, com um valor-p menor ou igual a 0,05. Isso significa que a velocidade de corte teve um impacto considerável nos valores médios de rugosidade obtidos durante a usinagem. Em particular, a contribuição percentual (Prop%) da velocidade de corte na rugosidade (Ra) foi de 38,8% para o método MQF e de 51,9% para o processo a seco.

Abaixo são apresentados os gráficos de contorno da variável de resposta Ra (Gráficos 2, 3, 4 e 5). Esses gráficos destacam principalmente a relação entre V_c e as outras variáveis de entrada, evidenciando a maior influência de V_c em comparação com as demais.

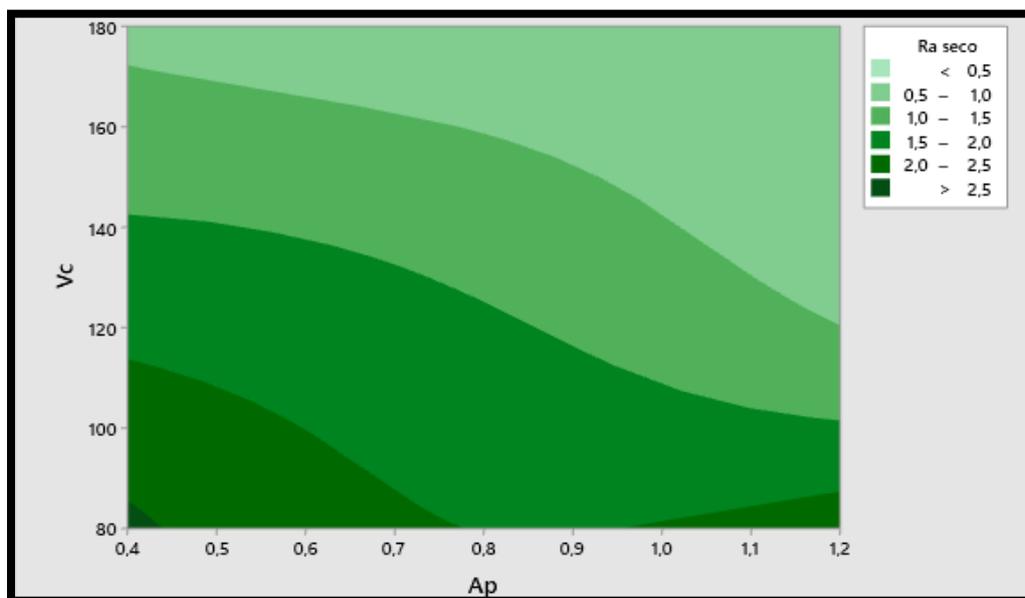
Observa-se que, nos referidos gráficos, V_c está representado ao longo da linha das ordenadas, o que facilita a visualização das relações entre V_c, F_z e A_p. Ao considerar V_c, torna-se perceptível que, enquanto as variações de rugosidade ocorrem ao longo de toda a sua amplitude, as maiores variações nas demais variáveis ocorrem principalmente entre seus valores mínimos e máximos.

No Gráfico 2 é possível perceber que os valores de V_c são mais relevantes para a variável resposta em relação aos de F_z. As colorações mais escuras demonstram valores de rugosidade mais altos.

Gráfico 2 – Gráfico de contorno de Ra seco versus V_c (m/min); F_z (mm/z)

Fonte: Do autor (2023).

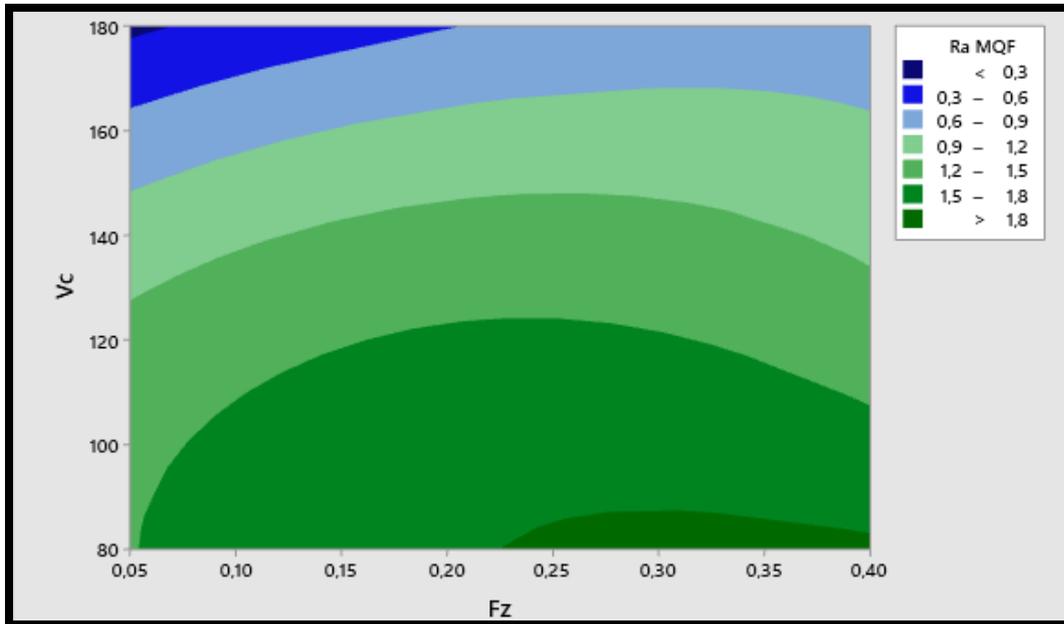
Conforme ilustrado no Gráfico 3, os valores de V_c tem maior relevância em relação ao A_p . É possível perceber uma leve tendência à diminuição de níveis de rugosidade ao aumentar o valor de A_p .

Gráfico 3 – Gráfico de contorno de Ra seco versus V_c (m/min); A_p (mm)

Fonte: Do autor (2023).

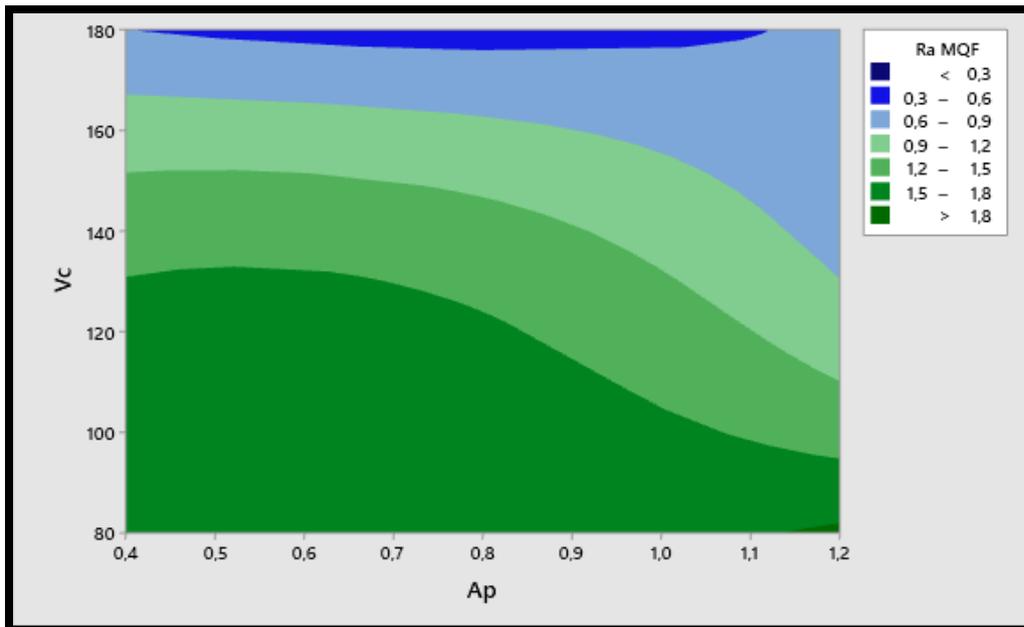
De forma semelhante ao Gráfico 2, no Gráfico 4 os valores de V_c tem um grau de importância maior em reação ao F_z . Porém, neste caso, ao aplicar o MQF, demonstrou valores de rugosidade maiores para avanços mais altos.

Gráfico 4 – Gráfico de contorno de MQF seco versus V_c (m/min); F_z (mm/z)



Fonte: Do autor (2023).

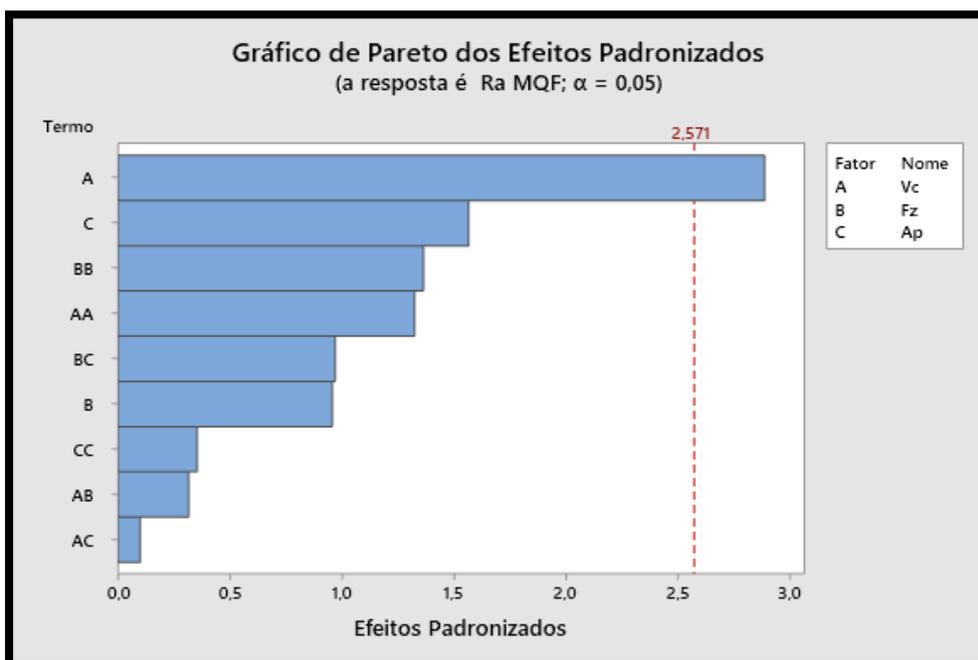
No Gráfico 5, ainda é demonstrado que V_c é o fator determinante na variável resposta, ainda da mesma forma do Gráfico 4, pode-se perceber que a aplicação de MQF gerou valores de rugosidade menores em comparação ao corte a seco.

Gráfico 5 – Gráfico de contorno de R_a MQF versus V_c (m/min); A_p (mm)

Fonte: Do autor (2023).

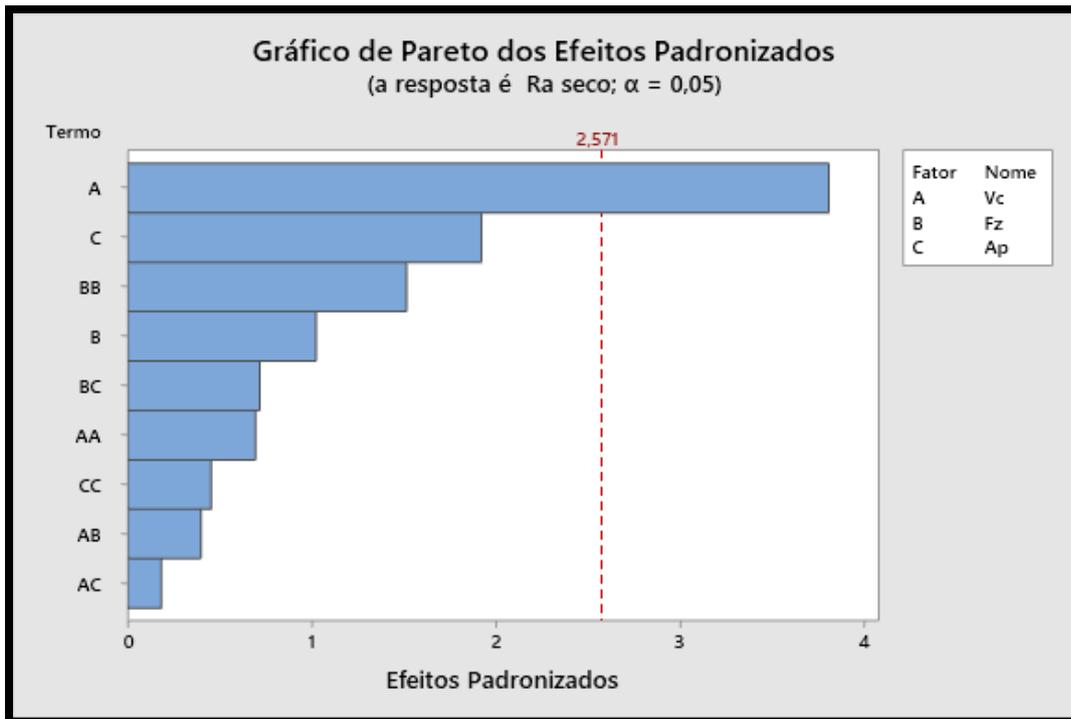
Com o uso do software Minitab®, foram criados os gráficos de Pareto para aprimorar a identificação da importância de cada fator, bem como das interações entre esses fatores e seus respectivos quadrados (Gráficos 6 e 7).

Gráfico 6 – Gráfico de Pareto da relevância dos fatores no estudo com MQF



Fonte: Do autor (2023).

Gráfico 7 – Gráfico de Pareto da relevância dos fatores no estudo a seco



Fonte: Do autor (2023).

Além disso, a profundidade de corte (A_p) demonstrou ter uma contribuição relativamente importante no processo, representando 11,4% para o método MQF e 13,2% para o processo a seco. Embora não tenha atingido o valor de “P” necessário para confirmar sua confiabilidade estatística de 95%, sua contribuição sugere que pode ser um fator a ser considerado em uma otimização de processo.

4.3 Equação de regressão

A partir do estudo realizado com o auxílio do Minitab® 19, foram geradas as equações de regressão que demonstram os resultados para a rugosidade R_a , abaixo expressadas:

$$R_a (MQF) = 1,15 + 0,0059 Vc + 4,16 Fz + 0,61 Ap - 0,000070 Vc*Vc - 5,85 Fz*Fz - 0,292 Ap*Ap + 0,0046 Vc*Fz - 0,00062 Vc*Ap - 1,75 Fz*Ap$$

$$R_a (\text{seco}) = 4,04 - 0,0260 V_c + 6,65 F_z - 1,25 A_p + 0,000043 V_c * V_c - 7,73 F_z * F_z + 0,443 A_p * A_p - 0,0069 V_c * F_z + 0,00137 V_c * A_p - 1,54 F_z * A_p$$

O BBD é uma abordagem estatística que permite a otimização de múltiplos fatores simultaneamente. Ele auxilia na compreensão de como esses diferentes fatores impactam uma resposta específica. Neste estudo, utilizando equações de regressão, foi possível determinar os fatores otimizados com base em um valor alvo desejado para a variável resposta, que no caso é a rugosidade, conforme destacado na Tabela 11. Essa técnica ajuda a identificar a combinação ideal de variáveis que melhor se alinham com os objetivos pré-estabelecidos em relação à rugosidade.

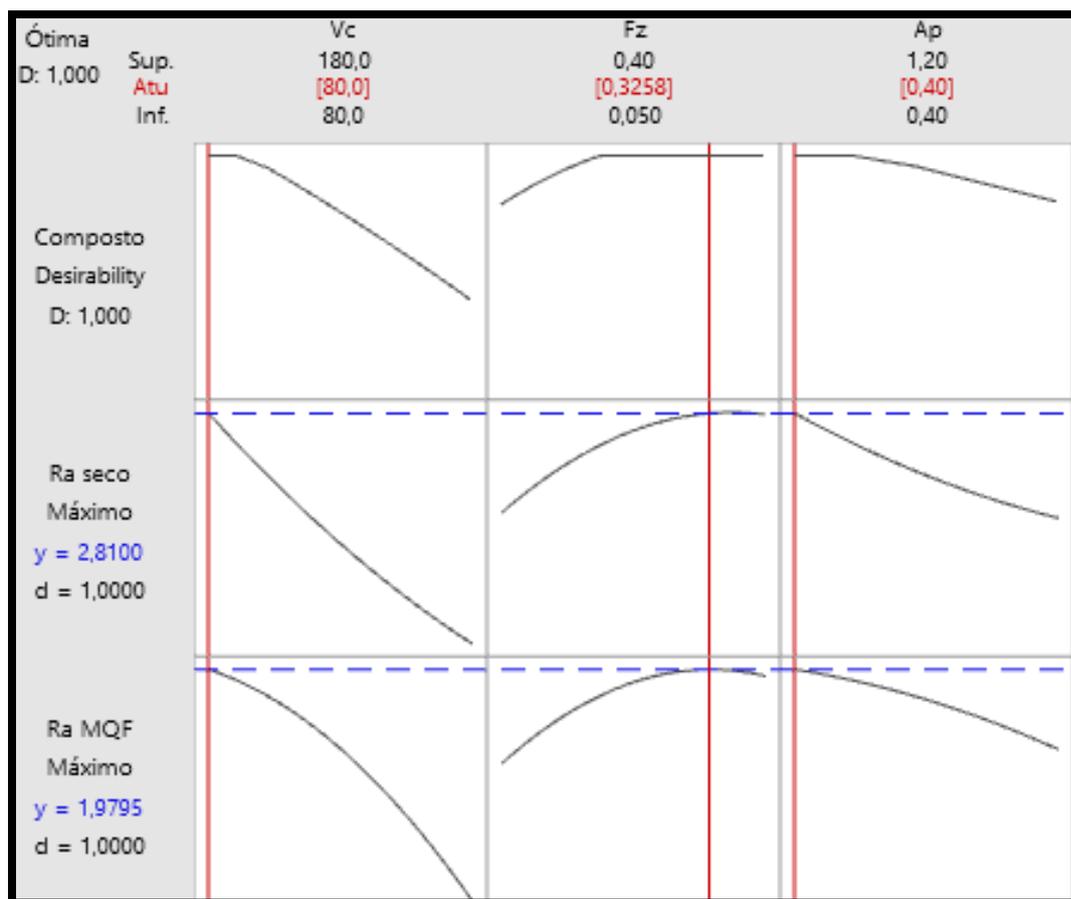
O gráfico de otimização (Gráfico 8) ilustra como cada fator (listados nas colunas) afeta as respostas ou o grau de desejabilidade combinada (indicado pelas linhas). As linhas verticais vermelhas no gráfico representam as configurações atuais dos fatores. Os números exibidos no topo de cada coluna mostram os níveis atuais dos fatores (destacados em vermelho). Já as linhas azuis horizontais e os números associados a elas mostram as respostas correspondentes para esses níveis atuais dos fatores. Em resumo, o gráfico de otimização oferece uma representação visual de como as diferentes configurações dos fatores influenciam as respostas desejadas ou os resultados pretendidos.

Tabela 11 – Resultado otimização das variáveis de entrada

| Parâmetros | | | | | |
|--|------------------|-----------------------|------------------|------------------|----------------|
| Resposta | Meta | Inferior | Alvo | | |
| Ra MQF(μm) | Máximo | 0,24 | 1,85 | | |
| Ra seco(μm) | Máximo | 0,35 | 2,6 | | |
| Solução | | | | | |
| Solução | Vc(m/min) | Fz(mm/z) | Ap(mm) | Ra MQF | Ra SECO |
| 1 | 80 | 0,324192 | 0,4 | 1,976 | 2,810 |
| Predição de múltiplas respostas | | | | | |
| Resposta | Ajuste | EP do Ajustado | IC de 95% | IP de 95% | |
| Ra MQF(μm) | 1,980 | 0,240 | (1,363; 2,596) | (1,085; 2,875) | |
| Ra seco(μm) | 2,81 | 0,285 | (2,077; 3,543) | (1,746; 3,874) | |

Fonte: Do autor (2023).

Gráfico 8 – Gráficos de otimização



Fonte: do autor (2023).

4.3.1 Validação do método

Para validar a eficácia do método de otimização das variáveis de entrada por meio de curvas de regressão, foi realizado um procedimento inverso. Nesse processo, considerando que, conforme os resultados da ANOVA, a variável de entrada tem o menor impacto, ajustou-se levemente o valor de F_z , que inicialmente fora otimizado para 0,324192 mm/z, para um valor aproximado de 0,225 mm/z. Essa modificação foi baseada nos dados coletados durante testes anteriores (Tabela 12).

Essa abordagem serviu como uma validação prática, possibilitando verificar se os valores das variáveis de saída retornavam a uma faixa semelhante àquela observada nos experimentos iniciais. Esse método foi crucial para confirmar a eficiência do procedimento, demonstrando sua capacidade de prever e reproduzir com precisão os resultados desejados.

Tabela 12 – Validação das equações de regressão

| Variável | | Configuração | | |
|------------------------|--------|----------------|----------------|----------------|
| V _c (m/min) | | 80 | | |
| F _z (mm/z) | | 0,225 | | |
| A _p (mm) | | 0,4 | | |
| Resposta | Ajuste | EP do Ajustado | IC de 95% | IP de 95% |
| Ra MQF(μm) | 1,919 | 0,219 | (1,357; 2,480) | (1,061; 2,777) |
| Ra seco(μm) | 2,686 | 0,260 | (2,019; 3,354) | (1,666; 3,706) |

Fonte: Do autor (2023).

Conforme evidenciado na Tabela 12, os valores de rugosidade obtidos estão em concordância com os valores coletados durante a fase experimental, conforme indicado na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados experimentais da amostra 5

| amostra | V _c (m/min) | F _z (mm/z) | A _p (mm) | R _a Seco(μm) | R _a MQF(μm) |
|---------|------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|
| 5 | 80 | 0,225 | 0,4 | 2,6 | 1,75 |

Fonte: Do autor (2023).

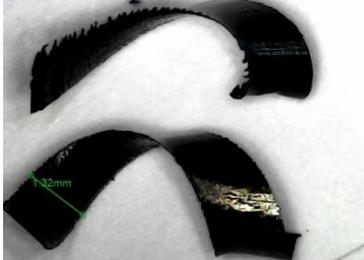
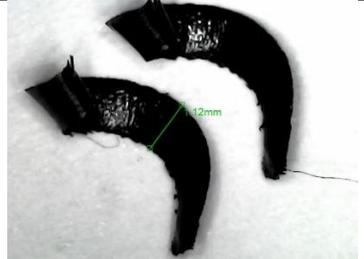
4.4 Análise morfológica dos cavacos

Ao analisar a morfologia dos cavacos mediante imagens obtidas por meio do microscópio, tornou-se evidente que os dados de corte desempenham um papel crucial como fatores determinantes. Conforme descrito na literatura, os cavacos com formatos enrolados e mais curtos são considerados mais favoráveis. Outro aspecto significativo a ser considerado é a presença de lamelas nas arestas dos cavacos. Conhecida como "dentes de serra", a lamela é considerada um fator indesejado nesse contexto. A formação dos dentes de serra pode demonstrar instabilidades no processo de usinagem, como vibração, velocidade de corte inadequada para o tipo de processo e material usinado.

Destaca-se que o fator mais relevante na configuração do cavaco é o F_z, sendo que os resultados mais satisfatórios foram associados a valores mais baixos. Nesses casos, observou-se uma menor formação de dentes de serra, além de uma melhor configuração de cavacos curvos e segmentados. Como indicado no Quadro 3, foram identificadas as quatro formas mais desejáveis de cavacos (amostras 1, 4, 11 e 15).

Além disso, ainda é possível perceber que, na amostra 1, em que o valor de A_p é máximo, houve algumas formações lamelares.

Quadro 3 – Cavacos com melhor morfologia encontrada

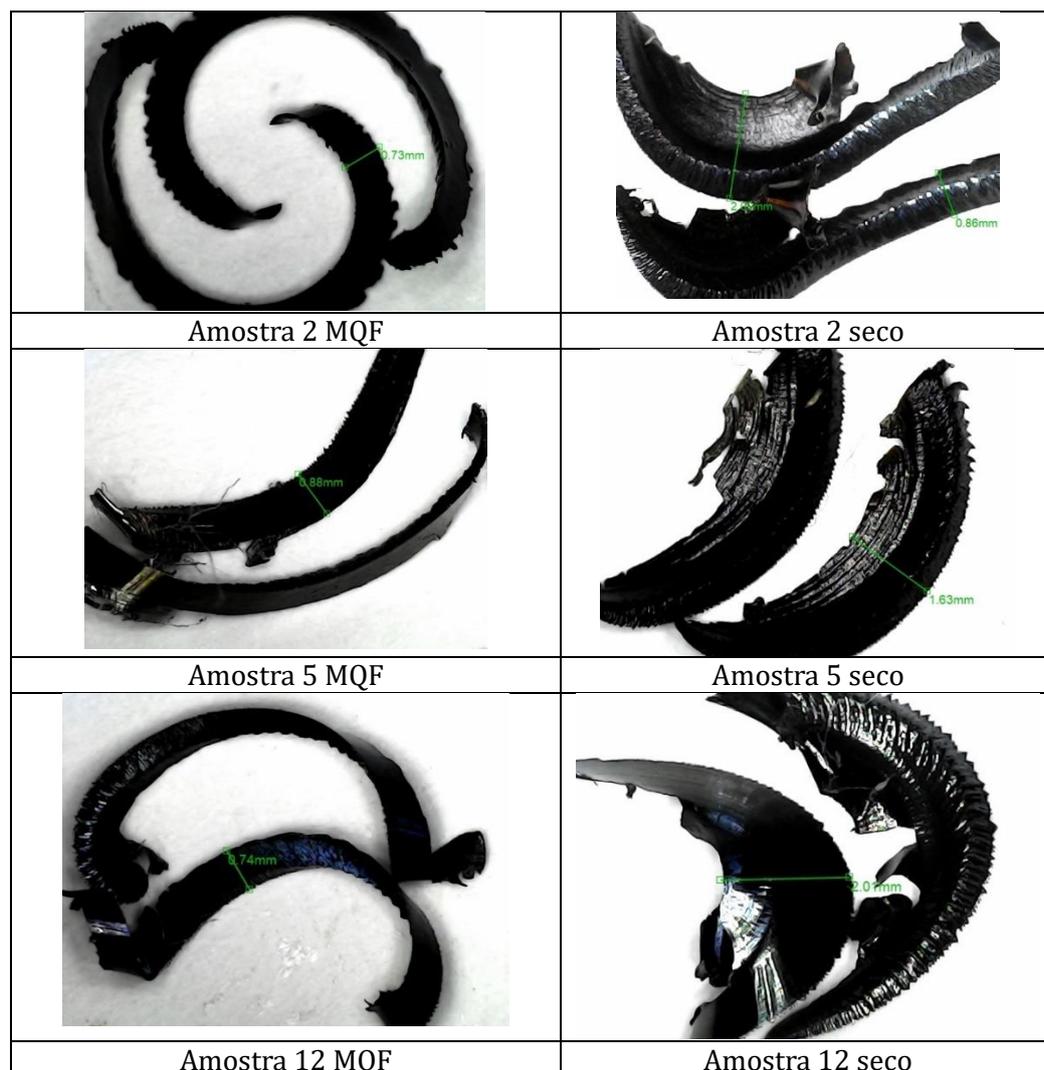
| Amostra 1 MQF | Amostra 1 Seco | Parâmetros de corte |
|---|--|--|
|  |  | $V_c = 130$ (m/min) $F_z = 0,05$ (mm/z) $A_p = 1,2$ (mm) |
| Amostra 4 MQF | Amostra 4 Seco | Parâmetros de corte |
|  |  | $V_c = 130$ (m/min) $F_z = 0,05$ (mm/z) $A_p = 0,4$ (mm) |
| Amostra 11 MQF | Amostra 11 Seco | Parâmetros de corte |
|  |  | $V_c = 180$ (m/min) $F_z = 0,05$ (mm/z) $A_p = 0,8$ (mm) |
| Amostra 15 MQF | Amostra 15 Seco | Parâmetros de corte |
|  |  | $V_c = 80$ (m/min) $F_z = 0,05$ (mm/z) $A_p = 0,8$ (mm) |

Fonte: Do autor (2023).

Durante a análise para comparação dos processos de usinagem a seco e com o uso de MQF, foco principal deste estudo, notou-se que as maiores diferenças ocorreram nas amostras 2, 5 e 12, quando comparados os cavacos gerados nesses dois métodos.

Nestas amostras em particular, foi observada uma distinta dificuldade no desprendimento dos cavacos da superfície da peça usinada quando aplicada a usinagem a seco. Em vez de serem cortados suavemente, os cavacos pareciam ser arrancados, o que resultava em uma espécie de alongamento lateral no corpo do cavaco, tornando-o mais alargado quando comparado com a amostra em que foi empregado o MQF.

Quadro 4 – Comparativo entre cavacos com formação alongada



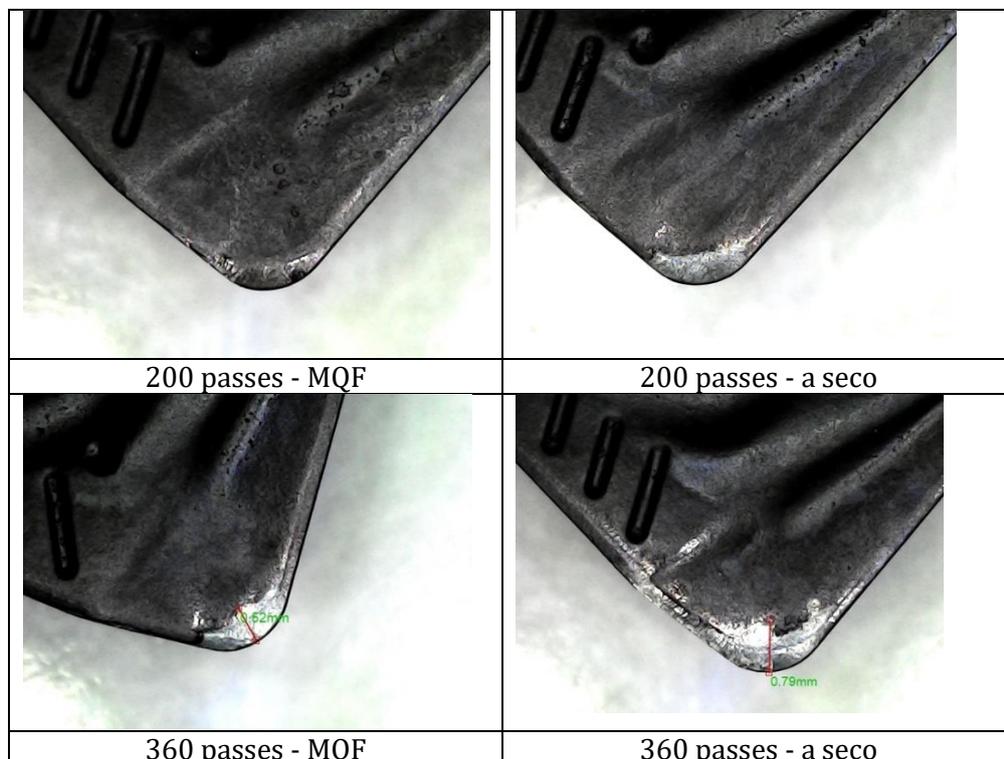
Fonte: Do autor (2023).

4.5 Análise de desgaste dos insertos

Para analisar o desgaste das ferramentas, foram realizadas várias etapas de usinagem até o ponto em que o desgaste se tornou visível. A primeira medição foi

feita após 200 operações usando tanto a estratégia de corte com MQF quanto a usinagem a seco. Posteriormente, foram conduzidas mais 160 operações em cada estratégia, seguidas de uma nova avaliação do desgaste. O Quadro 5 apresenta as imagens dos insertos no momento de cada medição.

Quadro 5 – Imagem dos insertos



Fonte: Do autor (2023).

Para avaliar o desgaste de ferramentas de corte na usinagem, é utilizada como base a ISO 3685 (1993), onde é avaliado o desgaste de flanco. No presente estudo o desgaste de flanco foi inexpressivo, impossibilitando a comparação, sendo que o principal desgaste observado nos insertos foi o de cratera junto ao flanco superior.

Nos primeiros 200 passes, já era possível identificar um leve desgaste de cratera, contudo sem impacto substancial na usinagem. Após a execução de mais 160 passes, tornou-se evidente o impacto do desgaste de cratera das ferramentas durante o corte a seco. Em seguida, foram realizados os mesmos 160 passes, mas utilizando a estratégia MQF.

Foi constatada uma redução do desgaste de cratera entre as duas técnicas empregadas. No inserto utilizado no corte a seco, houve um desgaste notavelmente

maior, tanto no desgaste de cratera quanto no flanco, em comparação ao que utilizou a técnica de MQF.

5 CONCLUSÃO

Este estudo comparou a textura da superfície usinada do aço SAE 4140 submetido a fresamento de face CNC, utilizando o método MQF e a seco. Através de um projeto de experimentos BBD, foram identificados os níveis dos fatores estudados que resultaram na melhor textura. O estudo é relevante para a ciência pois apresenta resultados de otimização de processo, considerando os fatores controláveis do processo e a interação do fluido lubrificante sintético na superfície usinada.

A comparação entre a usinagem a seco e a aplicação do MQF revelou que, apesar de diferenças relativamente pequenas na rugosidade, a técnica do MQF proporciona melhorias na qualidade da superfície usinada. A velocidade de corte (V_c) destaca-se como um fator determinante, influenciando diretamente a rugosidade

O BBD, ou Box-Behnken Design, é um método estatístico que permite projetar experimentos que fornecem informações sobre a relação entre muitas variáveis. No contexto da usinagem, o BBD pôde ser usado para identificar os fatores que influenciam a rugosidade da superfície usinada.

Os resultados da ANOVA mostraram que o valor-p da velocidade de corte (V_c) foi menor que 0,05 (α), indicando que a V_c é um fator estatisticamente significativo na rugosidade com confiabilidade superior a 95%. A contribuição percentual da V_c foi notável, representando 38,8% no MQF e 51,9% no processo a seco. Isso significa que a V_c é responsável por uma parcela significativa da variação da rugosidade, sendo possível perceber que as diferentes combinações de parâmetros apresentaram resultados distintos no processo. Foi possível notar que as combinações com V_c mais alto e lubrificação MQF resultaram em níveis mais baixos de rugosidade.

A análise da morfologia dos cavacos revelou que os dados de corte desempenham um papel crucial na determinação de características favoráveis ou indesejadas. Cavacos enrolados e mais curtos são considerados mais propícios, enquanto a presença de lamelas nas arestas, conhecida como "dente de serra", é indesejada. O fator mais relevante na configuração do cavaco foi identificado como F_z , sendo que valores mais baixos estiveram associados a resultados mais satisfatórios, com menor formação de "dente de serra" e configuração melhorada de cavacos curvos e segmentados.

O MQF também reduz o desgaste das ferramentas em comparação com a usinagem a seco. No estudo realizado com aço SAE 4140, foi observado que o MQF resultou em uma redução no desgaste de cratera das ferramentas após 360 passes.

A realização deste trabalho demonstra a importância da utilização de novas técnicas de manufatura dentro da indústria, que permitem a produção de peças e produtos com maior qualidade, eficiência e produtividade. Além disso, o trabalho também demonstra a importância das técnicas de otimização, que auxiliam os engenheiros mecânicos a encontrarem soluções mais eficientes para problemas complexos. Essas técnicas podem ser essenciais para o desenvolvimento de novas tecnologias e produtos, e muito importantes para a competitividade das empresas no mercado global.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, propõem-se:

- a) analisar como a composição química e o tipo de microestrutura do aço SAE 4140 influenciam na morfologia do cavaco durante o processo de fresamento frontal;
- b) realizar uma investigação mais abrangente para examinar como a alternância entre corte a seco e a utilização de MQF influencia o desgaste dos flancos nos insertos durante o processo de fresamento frontal do aço SAE 4140, conforme descrito na norma ISO 3685 (1993), utilizando uma quantidade maior de amostras;

- c) realizar uma análise para avaliar a viabilidade da técnica de lubrificação por MQF em comparação com o corte a seco, investigando as vantagens e desvantagens associadas a cada abordagem.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Paulo Samuel D. **Processos de Usinagem - Utilização e Aplicações das Principais Máquinas Operatrizes**. São Paulo: Érica, 2015. E-book.

Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788536520070>.

Acesso em: 21 abr. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 3685:**

Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento. Rio de Janeiro:

ABNT, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4288:**

Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil -

regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASTM INTERNATIONAL. **A29 - Standard specification for steel bars, carbon and alloy, hot-wrought, general requirements for**. Apparatus. USA, 2015. Disponível

em: file <https://www.fushunspecialsteel.com/wp-content/uploads/2015/09/ASTM-A29-Standard-Specification-Steel-Bars-Carbon-and-Alloy-Hot-Wrought-General-Requirements.pdf>. Acesso em: 2 out. 2023

BENER. **Akira Seiki** - Centro de Usinagem - SR3 XP. 2023. il. color. Disponível em:

https://www.bener.com.br/maquinas/Akira_Seiki_-_Centro_de_Usinagem_-_SR3_XP. Acesso em 30 mai. 2023.

CHEMIN, Beatris F. **Manual da Univates para trabalhos acadêmicos:**

planejamento, elaboração e apresentação. 5. ed. Lajeado, RS: Univates, 2023. E-book. Disponível em: <https://www.univates.br/editora-univates/publicacao/402>.

Acesso em: Acesso em: 01 mar. 2023.

COELHO, Reginaldo T; SILVA, Eraldo Janonne da. **Força e potência de corte em torneamento**. São Paulo, USP: 2018. Disponível em:

https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5292934/mod_resource/content/1/3%20-%20Forma%C3%A7%C3%A3o%20de%20cavacos%20em%20Usinagem.pdf.

Acesso em: 15 nov. 2023.

DIB, Marcel Henrique Militão. **Fundamentos do fresamento: uma aplicação em microfresamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). São Carlos, SP: USP, 2013. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18145/tde-31102013-165527/pt-br.php>. Acesso em: 05 out. 2023.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 9. ed. São Paulo: Artliber, 2014.

DINO-LITE. **RK-06**. 2023. il. color. Disponível em: <https://dinolite.com.br/produto/rk-06/>. Acesso em 05 jun. 2023.

FEIX, E. C. **Otimização do torneamento de acabamento a seco e com MQL nas ligas de alumínio 6082-T6 e 7075-T6 utilizando Box-Behnken Design**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. E-book. São Paulo: Blucher, 1970. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788521214199>. Acesso em 21 abr. 2023.

FITZPATRICK, Michael. **Introdução aos processos de usinagem - Série Tekne**. Porto Alegre: AMGH, 2013. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788580552294>. Acesso em: 01 mai. 2023.

FITZPATRICK, Michael. **Introdução à usinagem com CNC - Série Tekne**. Porto Alegre: AMGH, 2013. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788580552522>. Acesso em: 01 mai. 2023.

GARCIA, R. F. **Análise comparativa do fresamento frontal de acabamento em aços inoxidáveis duplex DX 2205 e LDX 2101**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS: Lume UFRGS, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/194547>. Acesso em: 02 nov. 2023.

HACKENHAAR, W. **Avaliação da eficiência térmica e de fusão na soldagem MAG em diferentes geometrias de juntas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS: Lume UFRGS, 2016. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/141208>. Acesso em: 15 out. 2023.

KENNAMETAL. **Reduced Weldon Shank**. 2023. il. color. Disponível em: <https://www.kennametal.com/pt/pt/products/fam.mill-1-14-end-mills-reduced-weldon-shank-inch.100000041.html?pdpQuery=:relevance:allCategoriesKMT:20478624:allCategoriesKMT:57493250:obsoleteFacet:false&sort=&pageSize=16&category=undefined>. Acesso em 02 mai. 2023.

LOBO, Renato N. **Gestão da Qualidade**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2020. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788536532615>. Acesso em: 20 mai. 2023.

MACHADO, Álisson, R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2015. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788521208440>. Acesso em: 25 mar. 2023.

Minitab. **Suporte**. 2023. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/response-surface/analyze-response-surface-design/interpret-the-results/key-results/?SID=129050>. Acesso em: 15 out. 2023.

MONTGOMERY, D. **Design and analysis of experiments**. John Wiley & Sons Inc. 8. ed. Arizona: State University, 2013.

REBECHI, João Guilherme. **Correlações numéricas entre taxa de resfriamento, microestruturas e propriedades mecânicas para o tratamento térmico do aço AISI/sae 4140**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2011. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/37383/000821556.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 30 mai. 2023.

RIBEIRO, Alexandre de Sousa. **Aplicação de mínima quantidade de lubrificante no fresamento do aço SAE 8640**. Brasília: UnB, 2017. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/19767/1/2017_AlexandredeSousaRibeiro.pdf. Acesso em: 20 set. 2023.

RIBEIRO, Marcos Valério; MONQUEIRO, Luciano Henrique de Camargo. **Aplicação de MQF no Torneamento de Ti-6Al-4V**. 7º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Itatiaia: UNESP, 2013. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/cobef/2013/PDFS/COBEF2013-0371.pdf#:~:text=A%20t%C3%A9cnica%20da%20usinagem%20com%20quantidades%20m%C3%ADnimas%20de,que%20n%C3%A3o%20h%C3%A1%20problema%20de%20descarte%20do%20lubrificante>. Acesso em: 06 mai. 2023.

SANDVIK. **Desgaste das arestas de corte**. 2023. Sandvik Coromant UK. il. color. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/wear-on-cutting-edges>. Acesso em: 22 abr. 2023.

SANDVIK. **Fresamento concordante vs. fresamento discordante**. 2023. Sandvik Coromant UK. il. color. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/down-milling-vs-up-milling>. Acesso em: 08 out. 2023.

SILVA, Silvio Eduardo Teixeira Pinto da. **Análise das propriedades mecânicas e estruturais do aço SAE 4140 submetido a tratamento criogênico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do

Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, RJ: UENF, 2012. Disponível em: <https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/DISSERTA%C3%87%C3%83O-FINAL-5.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2023.

SILVA, Fábio Fernandes da. **Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento com ferramenta de topo esférico do aço AISI D6 endurecido.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, PR: UTFPR, 2018. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3806/1/CT_PPGEM_M_Silva%2C%20F%2C%A1bio%20Fernandes%20da_2018.pdf. Acesso em: 02 mai. 2023.

TOLEDO, Samuel Lucas; ROSA, Sílvia do Nascimento; WREGGE, Lucas Franco. **Análise de um dispositivo para aplicação de mínima quantidade de fluido na rugosidade do aço 1020.** Curitiba, ABCM: 2021. Disponível em: www.sistema.abcm.org.br/articleFiles/download/2950. Acesso em: 2023.

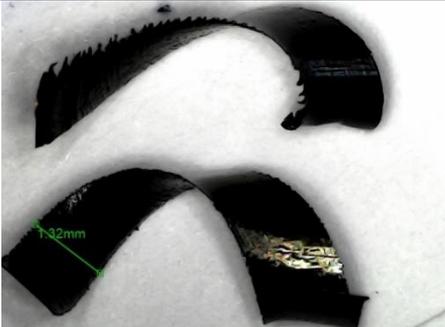
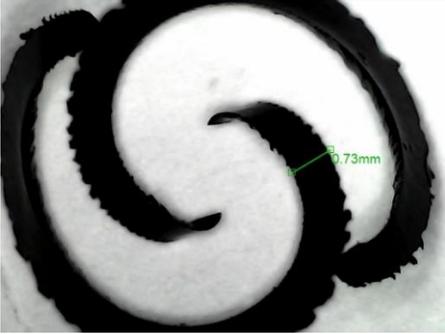
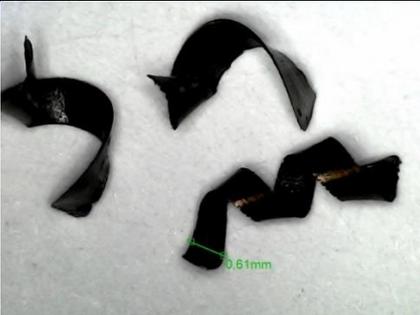
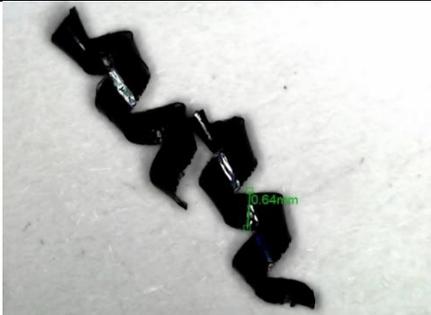
VALIM, Diego B. **Usinagem.** Porto Alegre: SAGAH, 2018. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788595025110>. Acesso em: 08 abr. 2023.

WIDIA. **Fresamento intercambiável** - Insertos para fresamento de canto. ISO/APMT. 2023. il. color. Disponível em: <https://www.widia.com/content/widia/pt/pt/products/fam.fresamento-intercambiavel-insertos-para-fresamento-de-canto-iso-apmt.100799376.html?pdpQuery=apmt:relevance:obsoleteFacet:false&sort=&pageSize=16&category=undefined>. Acesso em 20 abr. 2023.

ZEILMANN, Rodrigo P.; VACARO, Tiago; BORDIN, Fernando M.; SONDA, Vania. **Processos de usinagem e responsabilidade ambiental através da redução da utilização de fluidos de corte.** Caxias do Sul, UCS: 2009. Disponível em: https://www.academia.edu/39109767/PROCESSOS_DE_USINAGEM_E_RESPONSABILIDADE_AMBIENTAL_ATRAV%2C%89S_DA_REDU%2C%87%2C%83O_DA_UTILIZA%2C%87%2C%83O_DE_FLUIDOS_DE_CORTE. Acesso em: 31 out. 2023.

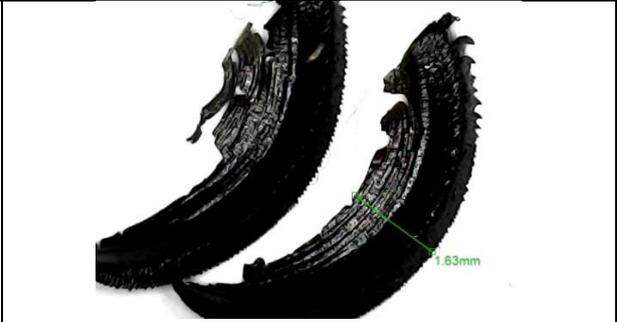
APÊNDICES

APÊNDICE A – Imagens dos cavacos

| Amostra 1 MQF | Amostra 1 seco |
|---|--|
|  |  |
| Amostra 2 MQF | Amostra 2 seco |
|  |  |
| Amostra 3 MQF | Amostra 3 seco |
|  |  |
| Amostra 4 MQF | Amostra 4 seco |
|  |  |
| Amostra 5 MQF | Amostra 5 seco |



Amostra 6 MQF



Amostra 6 seco



Amostra 7 MQF



Amostra 7 seco



Amostra 8 MQF



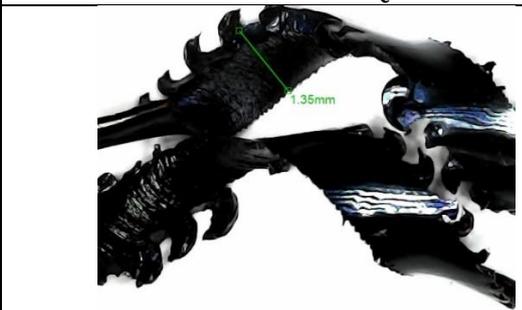
Amostra 8 seco



Amostra 9 MQF



Amostra 9 seco



Amostra 10 MQF



Amostra 10 seco



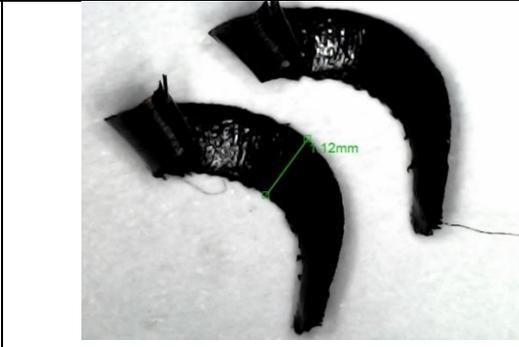
Amostra 11 MQF



Amostra 11 seco



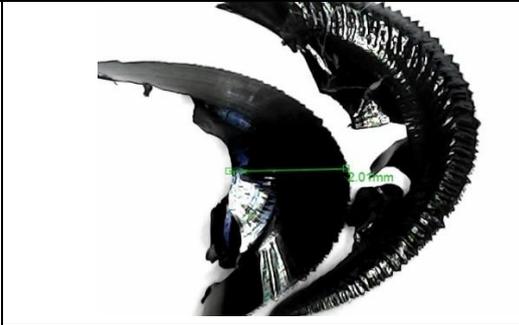
Amostra 12 MQF



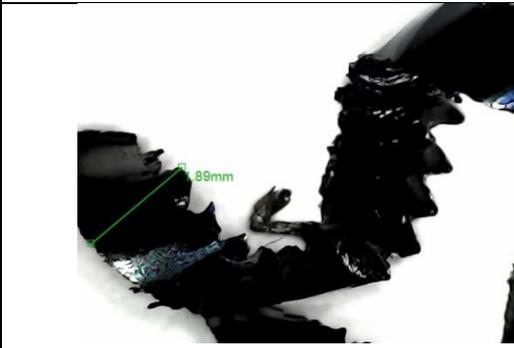
Amostra 12 seco



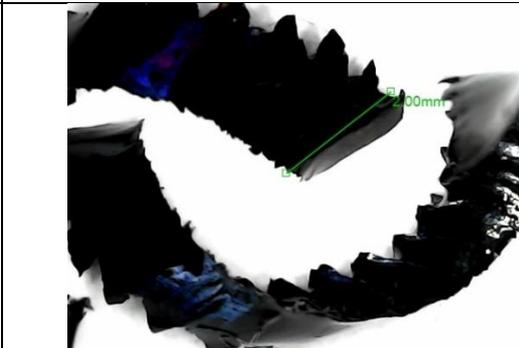
Amostra 13 MQF



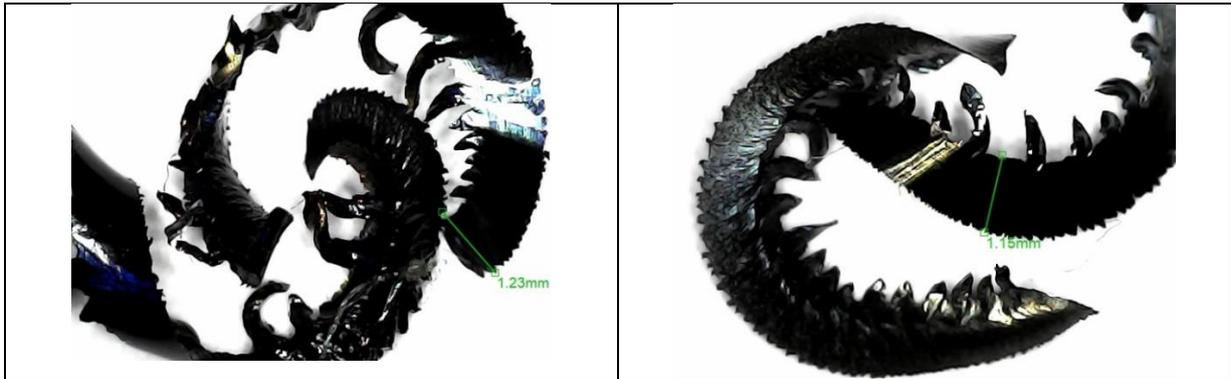
Amostra 13 seco



Amostra 14 MQF



Amostra 14 seco

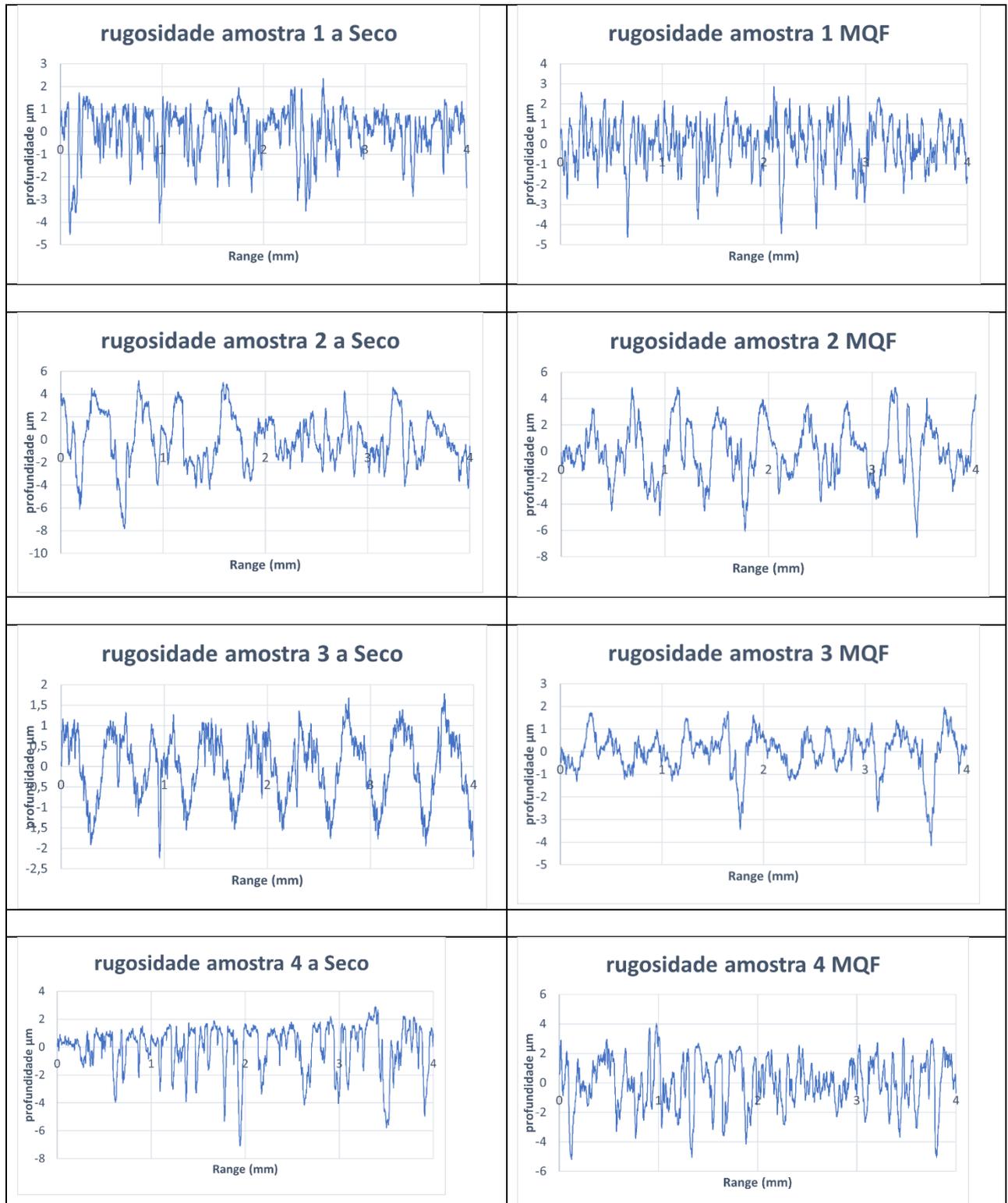


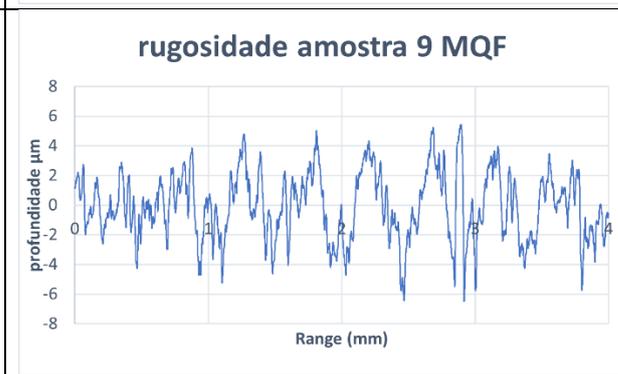
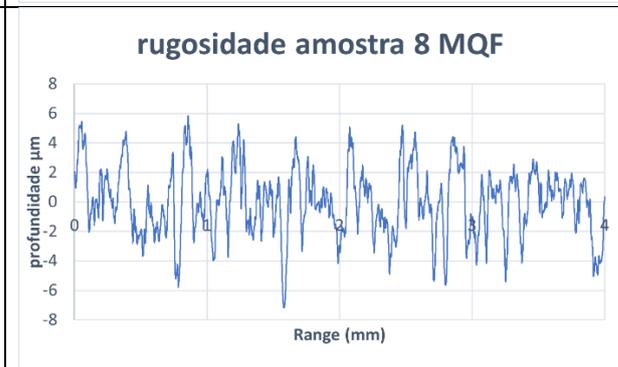
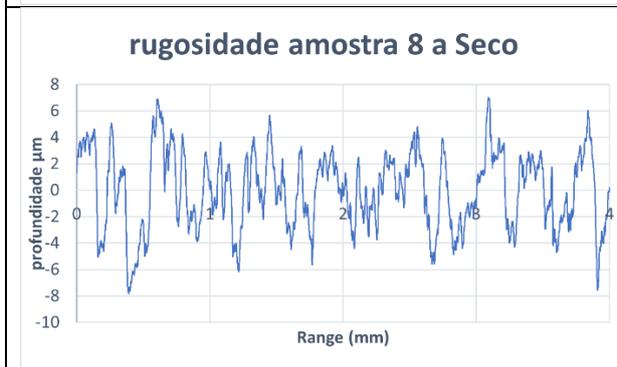
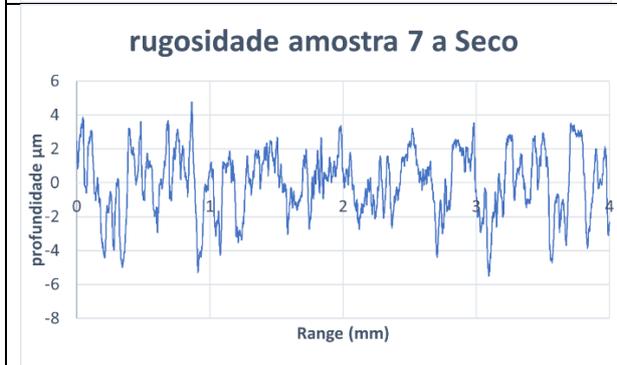
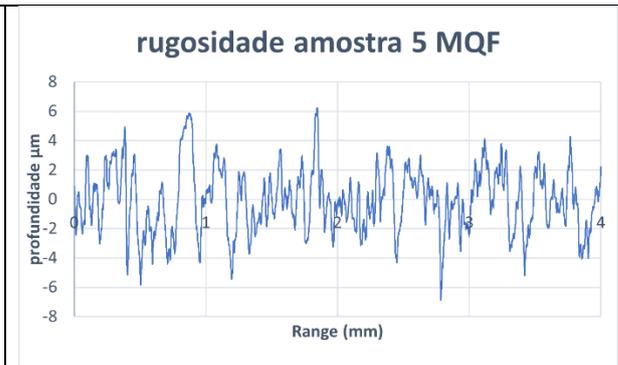
Amostra 15 MQF

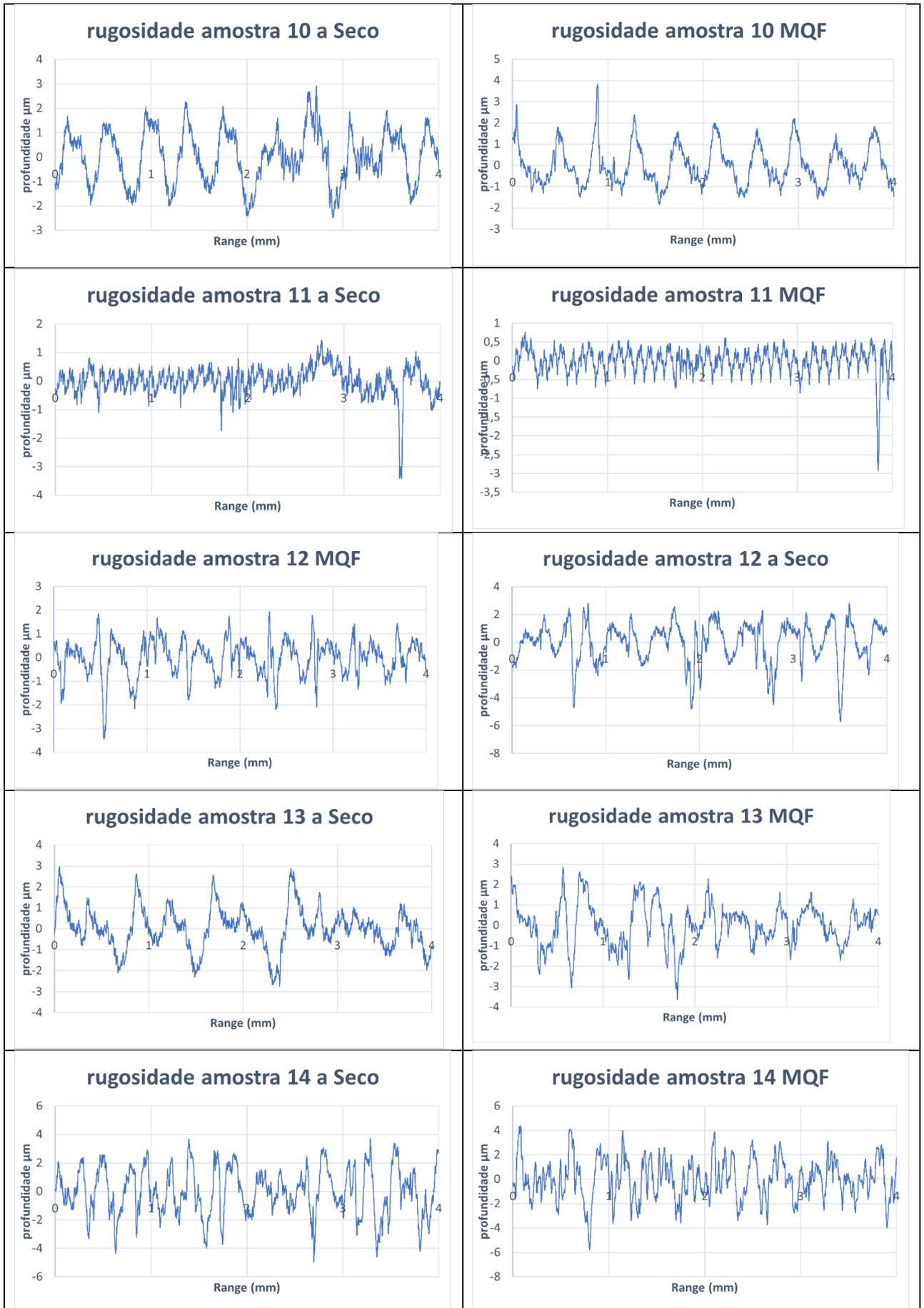
Amostra 15 seco

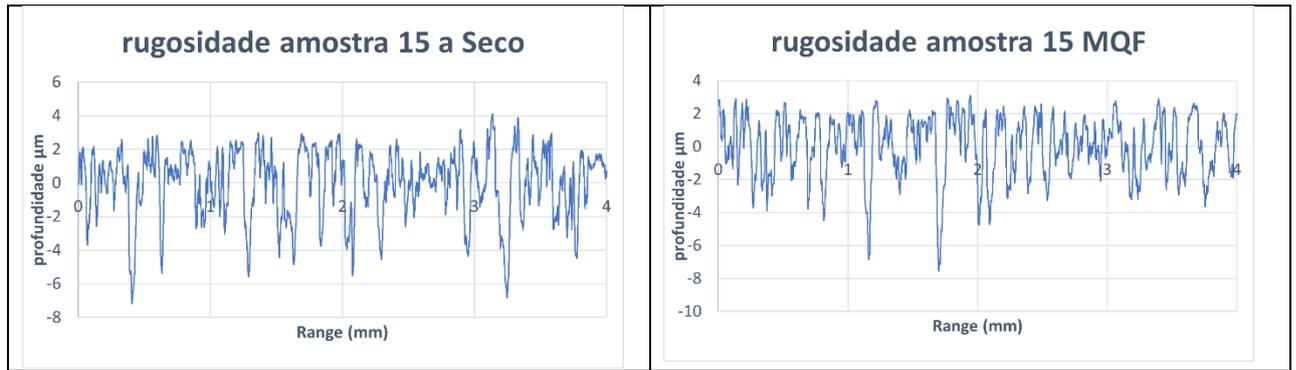


APÊNDICE B – Perfis de rugosidade









ANEXOS

ANEXO A - Laudo Aço SAE 4140 Gerdau



CERTIFICADO DE QUALIDADE
QUALITY CERTIFICATE
CERTIFICADO DE CALIDAD

Page 1/2

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------------------|---|--|--------------------------------|--------------------------|---|------------------------|--------------|----------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|
| NOTA FISCAL/INVOICE 0000505871 | PESO/WEIGHT (KG) 11.901,000 | OUR MANAGEMENT SYSTEM IS CERTIFIED TO ISO 9001 / IATF 16949 / ISO 14001 | | | | PRODUTO/PRODUCT BARRA LAMINADA REDONDA SEM TRATAMENTO TÉRMICO BRUTO DE LAMINAÇÃO | Cert. N° 0000180936 | | | | | | | | | |
| PART NUMBER GEPBRL50804140 | | PEDIDO/CUST.ORDER 45707 | ORD-FORNEC/ORD-SUPPLY 11744041 - 8142124172 | MATERIAL/MATERIAL 705025846 | LOTE/BATCH 2210526821 | | | | | | | | | | | |
| CLIENTE/CLIENT METALURGICA HASSMANN SA | | | QUALIDADE/GRADE SAE 4140 | BITOLA/SIZE 50,80 mm | CORRIDA/HEAT 22105268 | | | | | | | | | | | |
| NORMA/SPECIFICATION ET.HASSMANN.01 09 14.02.2019 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ANÁLISE QUÍMICA/CHEMICAL COMPOSITION | | | | | | | | | | | | | | | | |
| C % | Mn % | Si % | P % | S % | Cr % | Ni % | Mo % | V % | Cu % | Sn % | Al % | Ti % | Nb % | N % | B % | Pb % |
| 0,428 | 0,80 | 0,250 | 0,014 | 0,008 | 0,94 | 0,10 | 0,16 | 0,0090 | 0,137 | 0,0070 | 0,0160 | 0,0031 | 0,0090 | 0,0085 | 0,0004 | 0,0020 |
| Ca % | W % | Co % | As % | Zr % | Sb % | Zn % | Al+Nb % | Fórm 35 % | DI mm | | | | | | | |
| 0,0003 | 0,0030 | 0,0060 | 0,0060 | 0,0020 | 0,0020 | 0,0001 | 0,0250 | 0,0150 | 119,300 | | | | | | | |
| ENSAIOS MECÂNICOS/MECHANICAL PROP | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Dureza HB | LR MPa | LE MPa | Alongamento % | RA % | | | | | | | | | | | | |
| 302,00 | 849 | 720 | 1,40 | 1,3 | | | | | | | | | | | | |
| ENSAIOS METALOGRAFICOS/METALLOGRAPHIC TESTS | | | | | | | | | | | | | | | | |
| TG Austen. | DS Tot (Méd) | DS Par (Méd) | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 0,00 | 0,18 | | | | | | | | | | | | | | |
| MICROINCLUSÕES/INCLUSION RATING NUMBER | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ASTM/SAE/ISO | | | | | | | | | | | | | | | | |
| A - SF | A - SG | B - SF | B - SG | C - SF | C - SG | D - SF | D - SG | | | | | | | | | |
| 1,0 | 0,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 0,5 | | | | | | | | | |
| TEMPERABILIDADE/HARDENABILITY | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1/16" | 2/16" | 3/16" | 4/16" | 5/16" | 6/16" | 7/16" | 8/16" | 9/16" | 10/16" | 11/16" | 12/16" | 13/16" | 14/16" | 15/16" | 16/16" | 18/16" |
| HRC | HRC | HRC | HRC | HRC | HRC | HRC | HRC | HRC | HRC | HRC | HRC | HRC | HRC | HRC | HRC | |
| 58,5 | 58,1 | 57,4 | 56,7 | 56,2 | 55,5 | 54,5 | 52,5 | 51,7 | 49,8 | 46,6 | 46,3 | 44,7 | 44,3 | 44,0 | 43,1 | 41,5 |
| 20/16" | 22/16" | 24/16" | 26/16" | 28/16" | 30/16" | 32/16" | | | | | | | | | | |
| HRC | HRC | HRC | HRC | HRC | HRC | HRC | | | | | | | | | | |
| 41,2 | 40,0 | 39,8 | 38,8 | 38,5 | 38,1 | 37,9 | | | | | | | | | | |

ANEXO B – Medição de composição por Espectrômetro

| Cont. Group: | LA STEEL | | AN=53 TAN=12513 Common Group: | | | | | Thursday, August 18, 2022 16:14 |
|-------------------------------|----------|--------|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------------------------------|
| Sample No. [23082424 (4140)] | | | | | | | | |
| | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | |
| N=1 | .39119 | .27139 | .75999 | .01709 | .00718 | .05491 | .93006 | |
| N=2 | .40200 | .27257 | .77177 | .01649 | .00712 | .05551 | .93677 | |
| N=3 | .40898 | .27446 | .78517 | .02226 | .00974 | .05617 | .95419 | |
| Ave. | .40072 | .27281 | .77231 | .01862R | .00802R | .05553 | .94034 | |
| | Mo | Cu | V | Ti | Al | Nb | B | |
| N=1 | .16427 | .10307 | .00531 | .00232 | .01491 | .00006 | .00000 | |
| N=2 | .16609 | .10458 | .00560 | .00254 | .01520 | .00055 | .00003 | |
| N=3 | .17966 | .10660 | .00558 | .00310 | .01538 | .00291 | .00000 | |
| Ave. | .17001 | .10475 | .00550 | .00265R | .01516 | .00117R | .00001R | |
| | Fe% | Feint | | | | | | |
| N=1 | 97.278 | 6.6135 | | | | | | |
| N=2 | 97.243 | 6.6503 | | | | | | |
| N=3 | 97.176 | 6.7565 | | | | | | |
| Ave. | 97.232 | 6.6734 | | | | | | |

ANEXO C – Boletim Técnico Quimatic JET



QUIMATIC JET

*FLUIDO DE CORTE INTEGRAL SINTÉTICO À BASE DE ÁGUA
PARA DISPOSITIVOS DE APLICAÇÃO POR NÉVOA OU GOTEJAMENTO*

Descrição

QUIMATIC JET é um fluido sintético para corte de metais, constituído por uma combinação especial de lubrificantes sintéticos, aditivos e bactericidas, em água, que garantem ao processo ótima lubrificação, refrigeração e preservação. Aumenta a vida útil dos equipamentos e confere um excelente acabamento às peças. Seguro para o meio ambiente.

Finalidade

QUIMATIC JET foi especialmente desenvolvido para ser usado através dos dispositivos de aplicação por névoa ou gotejamento. Recomendado para uso junto com o NEBULIZADOR QUIMATIC Também pode ser usado nos reservatórios de máquinas operatrizes. Indicado para as operações de corte em metais ferrosos e aço inox, tais como: rosquear, furar, fresar, mandrilar, alargar, acabar, repuxar, usinar, desbastar, retificar, etc. Também pode ser utilizada com pastilhas de metal duro. Substitui os óleos solúveis nos reservatórios de máquinas operatrizes. Ideal para usinar metais de elevada dureza. É ótimo para serrar aço. Para todos os tipos de usinagem.

Características

QUIMATIC JET propicia ótima refrigeração e lubrificação. Garante melhor acabamento e assegura tolerâncias exatas. Aumenta a vida útil das ferramentas de corte, principalmente das pastilhas de metal duro. Mantém os rebolos limpos. Ecológico. Não contém solventes nocivos ou metais pesados. Tem odor leve e baixa taxa de evaporação. Não forma névoa irritante no ambiente. Contém aditivos anticorrosivos e agentes de preservação microbiológica. Não agride a pele do operador.

Propriedades

| | |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| Aspecto | Líquido translúcido amarelado |
| Densidade a 25 °C (g/mL) | 0,95 - 1,05 |
| Odor | Leve |
| pH à 25 °C | 9,0 - 10,0 |
| Teste de corrosão em cavacos de ferro | Sem corrosão após 2 h |
| Solubilidade em água | Completa |

ANEXO D – Programa NC

| | | |
|---------------------|---------------------|--------------------|
| % | N85 Y0. F#500 | N225 X2.997 Y7.417 |
| O1001 | N90 X-7.981 Y0.558 | N230 X3.507 Y7.19 |
| (T2 D=16. CR=0. - | N95 X-7.922 Y1.113 | N235 X4. Y6.928 |
| ZMIN=-0.5 - | N100 X-7.825 Y1.663 | N240 X4.474 Y6.632 |
| FRESAGEM DA | N105 X-7.69 Y2.205 | N245 X4.925 Y6.304 |
| FACE) | N110 X-7.518 Y2.736 | N250 X5.353 Y5.945 |
| N10 G90 G94 G17 | N115 X-7.308 Y3.254 | N255 X5.755 Y5.557 |
| G49 G40 G80 | N120 X-7.064 Y3.756 | N260 X6.128 Y5.142 |
| N15 G21 | N125 X-6.784 Y4.239 | N265 X6.472 Y4.702 |
| N20 G53 G00 Z0. | N130 X-6.472 Y4.702 | N270 X6.784 Y4.239 |
| | N135 X-6.128 Y5.142 | N275 X7.064 Y3.756 |
| (PERCURSO 3D1) | N140 X-5.755 Y5.557 | N280 X7.308 Y3.254 |
| N25 T2 M06 | N145 X-5.353 Y5.945 | N285 X7.518 Y2.736 |
| N30 S5000 M03 | N150 X-4.925 Y6.304 | N290 X7.69 Y2.205 |
| N35 G17 G90 G94 | N155 X-4.474 Y6.632 | N295 X7.825 Y1.663 |
| N40 G54 | N160 X-4. Y6.928 | N300 X7.922 Y1.113 |
| N45 M08 | N165 X-3.507 Y7.19 | N305 X7.981 Y0.558 |
| N50 G00 X-8. Y- | N170 X-2.997 Y7.417 | N310 X8. Y0. |
| 29.015 | N175 X-2.472 Y7.608 | N315 Y-29.015 |
| N55 G43 Z15. H02 | N180 X-1.935 Y7.762 | N320 Z4.5 F#504 |
| N60 #500=1000. | N185 X-1.389 Y7.878 | N325 G00 Z15. |
| (CORTE) | N190 X-0.836 Y7.956 | |
| N65 #504=1000. | N195 X-0.279 Y7.995 | N330 M05 |
| (EXIT) | N200 X0.279 | N335 M09 |
| N70 #508=333. | N205 X0.836 Y7.956 | N340 G53 G00 Z0. |
| (MERCULHO) | N210 X1.389 Y7.878 | N345 G49 |
| N75 G00 Z4.5 | N215 X1.935 Y7.762 | N350 G53 G00 X0. |
| N80 G01 Z-0.5 F#508 | N220 X2.472 Y7.608 | Y0. |
| | | N355 M30 |
| | | % |

ANEXO E – Certificado de Calibração de Rugosímetro Digital



Rua Antoninho D. Campagnollo, 33 - CNPJ: 03.245.071/0001-42 - Bairro Floresta
Fone/Fax: (54) 3225-3211 - 95.012-230 - Caxias do Sul/RS - E-mail: mitec@mitec.com.br

Página 1 de 1

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº: 31386/23

Versão: 20 - Data: 06/11/2023

CLIENTE

Solicitante: JA Industrial - Eireli
Endereço: Linha Ernesto Alves, 1470

Cidade: Imigrante
Estado: RS

DADOS DO EQUIPAMENTO

Descrição: Rugosímetro digital
Marca: Mitutoyo
Nº de Identificação: MR01

Resolução: 0,01 µm
Nº do Fabricante: Não consta

PADRÕES

| Código | Descrição | Nº Certificado | Laboratório | Validade |
|--------|----------------------|----------------|-------------|----------|
| PR-003 | Padrão de rugosidade | 1716/22 | CERT/RBC | 30/06/27 |

REFERÊNCIAS

Procedimento (s) de Calibração: MTC-R-017 Rev. 5 Norma (s) Técnica (s): NBR ISO 12179 de Ago/2002
Método: Calibração por comparação, utilizando padrão de rugosidade.
Condições Ambientais: Temperatura: 20 ± 2 °C Umidade Relativa: ----
Data do Recebimento: 06/12/2023 Data da Calibração: 06/12/2023 Data da Emissão: 07/12/2023

OBSERVAÇÕES

A calibração foi realizada nas instalações da empresa por solicitação da mesma.

Calibração Inicial (Antes do Ajuste)

| Parâmetro (Ra) - cut-off = 0,8 mm | | Unidade: µm | |
|-----------------------------------|-------|-------------|--|
| VC | Média | EM | |
| 3,10 | 3,05 | -0,05 | |

| Parâmetro (Rz) - cut-off = 0,8 mm | | Unidade: µm | |
|-----------------------------------|-------|-------------|--|
| VC | Média | EM | |
| 9,92 | 9,84 | -0,08 | |

| Resultados | Unidade: µm | | | |
|-----------------------------------|-------------|--------|------|------|
| | EM | IM (±) | k | Veff |
| Parâmetro (Ra) - cut-off = 0,8 mm | -0,05 | 0,09 | 2,00 | >100 |
| Parâmetro (Rz) - cut-off = 0,8 mm | -0,08 | 0,30 | 2,00 | >100 |

RICARDO
ZILIO:8908892109
1

Assinado de forma digital por
RICARDO ZILIO:89088921091
Dados: 2023.12.07 17:16:50
-03'00'

Fim

Definições:

| | | | |
|--------|--|-------|-----------------------------|
| VC: | Valor Convencional (Indicação do Padrão) | IM: | Incerteza de Medição |
| Média: | Série de Cinco Medições (Indicação do Instrumento) | Veff: | Graus de Liberdade Efetivos |
| EM: | Erro de Medição (Média - VC) | | |

Este certificado somente pode ser reproduzido por inteiro e com prévia autorização da Mitec.

Resultados válidos para o estado atual do instrumento em condições ideais de calibração.

Este certificado não tem valor para fins de metrologia legal e se limita exclusivamente ao instrumento calibrado.

A incerteza de medição expandida, multiplicada pelo (s) fator (es) de abrangência "k", para um nível de confiança de aproximadamente 95%, foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Este certificado foi assinado e emitido eletronicamente através do software Cali Lab e é válido desta forma.

ANEXO F – Certificado de Calibração de Projetor de Perfil



Rua Antoninho D. Campagnollo, 33 - CNPJ: 03.245.071/0001-42 - Bairro Floresta
Fone/Fax: (54) 3225-3211 - 95.012-230 - Caxias do Sul/RS - E-mail: mitec@mitec.com.br

Página 1 de 2

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°: 31385/23

Versão: 30 - Data: 30/06/2023

CLIENTE

Solicitante: JA Industrial - Eireli
Endereço: Linha Ernesto Alves, 1470
Cidade: Imigrante
Estado: RS

DADOS DO EQUIPAMENTO

Descrição: Projetor de perfil com tela de 300 mm
Resolução: Diversas
Marca: Mitutoyo
N° de Identificação: PP-01
N° do Fabricante: G00021503

PADRÕES

| <u>Código</u> | <u>Descrição</u> | <u>N° Certificado</u> | <u>Laboratório</u> | <u>Validade</u> |
|---------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------|
| EP-001 | Escala padrão de vidro de 0 - 50 mm | 3687/21 | CERTI/RBC | 30/04/27 |
| EP-002 | Escala padrão de vidro de 0 - 300 mm | 0468/23 | CERTI/RBC | 29/02/28 |
| ES-003 | Esquadro de precisão 100 x 70 mm | 1719/23 | CERTI/RBC | 30/06/28 |

REFERÊNCIAS

Procedimento (s) de Calibração: MTC-P-015 Rev. 7
Método: Calibração por comparação, utilizando escalas padrão de vidro e esquadro de precisão.
Norma (s) Técnica (s): JIS B 7184 de Mar/1999
Condições Ambientais: **Temperatura:** 25 ± 5 °C **Umidade Relativa:** ———
Data do Recebimento: 06/12/2023
Data da Calibração: 06/12/2023
Data da Emissão: 07/12/2023

OBSERVAÇÕES

A calibração foi realizada nas instalações da empresa por solicitação da mesma.

Este certificado somente pode ser reproduzido por inteiro e com prévia autorização da Mitec.

Resultados válidos para o estado atual do instrumento em condições ideais de calibração.

Este certificado não tem valor para fins de metrologia legal e se limita exclusivamente ao instrumento calibrado.

A incerteza de medição expandida, multiplicada pelo (s) fator (es) de abrangência "k", para um nível de confiança de aproximadamente 95%, foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Este certificado foi assinado e emitido eletronicamente através do software Cali Lab e é válido desta forma.