

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA – PPGMEC**  
**MESTRADO PROFISSIONAL**

**EVERTON FOUCHY DE CAMPOS**

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE GUME SOBRE A TEMPERATURA DURANTE  
O PROCESSO DE FRESAMENTO**

**CAXIAS DO SUL**

**2025**

**EVERTON FOUCHY DE CAMPOS**

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE GUME SOBRE A TEMPERATURA DURANTE  
O PROCESSO DE FRESAMENTO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul.

Área de concentração: Processos de fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

**CAXIAS DO SUL**

**2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Universidade de Caxias do Sul  
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

C198i Campos, Everton Fouchy de  
    Influência do tratamento de gume sobre a temperatura durante o processo  
    de fresamento [recurso eletrônico] / Everton Fouchy de Campos. – 2025.  
    Dados eletrônicos.  
  
    Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de  
    Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2025.  
    Orientação: Rodrigo Panosso Zeilmann.  
    Modo de acesso: World Wide Web  
    Disponível em: <https://repositorio.ucs.br>  
  
    1. Usinagem. 2. Fresagem (Trabalhos em metal). 3. Engenharia mecânica. I.  
    Zeilmann, Rodrigo Panosso, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 621.98

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)  
Carolina Machado Quadros - CRB 10/2236

**EVERTON FOUCHY DE CAMPOS**

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE GUME SOBRE A TEMPERATURA DURANTE  
O PROCESSO DE FRESAMENTO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul.  
Área de concentração: Processos de fabricação

**Aprovado em: 22 / 08 /2025.**

**Banca Examinadora**

Prof. Orientador Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dr. Leandro Corso  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dr. Giovani Dambros Telli  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva  
Universidade Federal de Uberlândia

## RESUMO

A usinagem é um processo essencial na fabricação moderna, permitindo alta precisão e produtividade na produção de peças metálicas. Entre os métodos de usinagem, o fresamento se destaca pela versatilidade e eficiência, porém apresenta desafios relacionados à geração de calor na interface ferramenta-peça, que afeta a vida útil da ferramenta e a qualidade do produto. Este trabalho investiga a influência do tratamento do gume da ferramenta sobre a temperatura durante o fresamento, utilizando medições por termopares embutidos na peça e na ferramenta, além de termografia infravermelha. Foram realizados ensaios comparativos com ferramentas sem tratamento e tratadas por polimento por arraste com mídias abrasivas HSC 1/300 e H 4/400. Os resultados indicaram que o tratamento do gume contribuiu para a redução da temperatura na peça, com destaque para a mídia H 4/400, que apresentou diminuição de até 20 °C em relação à ferramenta sem tratamento. Na ferramenta, as diferenças médias foram modestas, mas a termografia revelou menor ocorrência de picos térmicos e maior estabilidade nas ferramentas tratadas. Conclui-se que o polimento do gume favorece a dissipação térmica, prolonga a vida útil da ferramenta e contribui para práticas sustentáveis na usinagem, embora os efeitos médios sejam discretos. Recomenda-se ampliar os estudos para diferentes materiais, parâmetros de corte e técnicas de monitoramento em tempo real.

**Palavras-chave:** fresamento; temperatura; tratamento de gume; polimento; termopar; termografia.

## **ABSTRACT**

Machining is an essential process in modern manufacturing, enabling high precision and productivity in the production of metal parts. Among machining methods, milling stands out for its versatility and efficiency, but it presents challenges related to heat generation at the tool–workpiece interface, which affects tool life and product quality. This study investigates the influence of cutting-edge treatment on temperature during milling, using measurements from thermocouples embedded in the workpiece and the tool, as well as infrared thermography. Comparative tests were carried out with untreated tools and tools treated by drag finishing using abrasive media HSC 1/300 and H 4/400. The results indicated that edge treatment contributes to reducing workpiece temperature, with emphasis on the H 4/400 media, which showed a decrease of up to 20 °C compared to the untreated tool. On the tool, average differences were modest, but thermography revealed fewer thermal peaks and greater stability in treated tools. It is concluded that edge polishing favors thermal dissipation, extends tool life, and contributes to sustainable machining practices, although average effects are subtle. Further studies are recommended for different materials, cutting parameters, and real-time monitoring techniques.

**Keywords:** milling; temperature; cutting-edge treatment; polishing; thermocouple; thermography.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fresamento frontal e tangencial .....	1616
Figura 2 – Movimentos de concordância .....	17
Figura 3 – Terminologia das fresas de topo.....	18
Figura 4 – Geometria da extremidade das fresas de topo .....	19
Figura 5 – Exemplos de fresas de topo reto .....	20
Figura 6 – Geometrias de gume .....	21
Figura 7 – Variações de geometria de gume .....	22
Figura 8 – Esquema de geometria do gume.....	22
Figura 9 – Temperatura interna da ferramenta para diferentes razões.....	233
Figura 10 – Processos de acabamento .....	24
Figura 11 – Cadeia sequencial de influências do tratamento de gume na usinagem .....	25
Figura 12 – Polimento por oscilação.....	27
Figura 13 – Exemplo de distribuição de calor e temperaturas na usinagem de aço	29
Figura 14 – Regiões de calor durante formação de cavacos.....	30
Figura 15 – Esquema experimental para medição por pirômetro bicolor .....	34
Figura 16 – Medições de temperatura da ferramenta por câmera infravermelha ....	35
Figura 17 – Esquemático de termopar embutido na ferramenta durante corte.....	37
Figura 18 – Medição sem fio de termopar inserido na ferramenta em fresamento ..	38
Figura 19 – Configuração experimental de medição sem fio por termopar inserido à ferramenta .....	39
Figura 20 – Gráfico de temperatura x tempo para diferentes velocidades de corte.	40
Figura 21 – Embutimento de termopar em inserto de metal duro .....	40
Figura 22 – Atividades a serem desenvolvidas .....	43
Figura 23 – Polimento da ferramenta por arraste .....	46
Figura 24 – Corpo de prova AISI P20.....	46
Figura 25 – Centro de usinagem Hartford LG-500 .....	48
Figura 26 – Embutimento de termopares ao corpo de prova .....	49
Figura 27 – Módulo de aquisição de termopares QuantumX MAX1609KB .....	50
Figura 28 – Interface para análise de dados .....	50
Figura 29 – Equipamento EDM 440 NC .....	52

Figura 30 – Proposta de medição de temperatura por termopar .....	53
Figura 31 – Página de configuração.....	54
Figura 32 – Câmera Termográfica Flir ThermaCAM 360 .....	55
Figura 33 – Estação de usinagem preparada para ensaios .....	566
Figura 34 – Arestas de corte das ferramentas.....	65

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Boxplot comparativo das temperaturas entre os tratamentos .....	64
Gráfico 2 –	Gráfico de barras da média de temperatura por tratamento .....	65
Gráfico 3 –	Variação da temperatura no canal MX1609_0_CH_1 .....	67
Gráfico 4 –	Variação da temperatura no canal MX1609_0_CH_2 .....	68
Gráfico 5 –	Variação da temperatura no canal MX1609_0_CH_3 .....	69
Gráfico 6 –	Variação da temperatura no canal MX1609_0_CH_4 .....	70
Gráfico 7 –	Boxplot da distribuição da temperatura por tratamento da ferramenta	72
Gráfico 8 –	Gráfico de violino da distribuição da temperatura por tratamento .....	73
Gráfico 9 –	Variação da temperatura ao longo do tempo por tratamento .....	75
Gráfico 10 –	Distribuição das temperaturas registradas por ferramenta e repetição.	78
Gráfico 11 –	Distribuição das temperaturas por ferramenta e repetição .....	81
Gráfico 12 –	Boxplot temperatura máxima .....	86
Gráfico 13 –	Boxplot temperatura Mínima .....	87
Gráfico 14 –	Histograma comparativo de temperatura máxima .....	88
Gráfico 15 –	Histograma comparativo de temperatura mínima .....	89
Gráfico 16 –	Linha comparativa temperatura máxima vs. tempo (Índice) .....	90
Gráfico 17 –	Linha comparativa temperatura mínima vs. tempo (Índice). .....	91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidades e limitações de métodos de medição de temperatura .....	32
Tabela 2 – Parâmetros de corte .....	44
Tabela 3 – Ângulos da fresa de topo.....	45
Tabela 4 – Composição química aço AISI P20 .....	47
Tabela 5 – Dados de entrada e saída, pontos e métodos de medição adotados.....	56
Tabela 6 – Resultados do teste de Shapiro-Wilk para normalidade das distribuições de temperatura .....	61
Tabela 7 – Médias de temperatura por canal e teste .....	63
Tabela 8 – Resultado do teste de Kruskal-Wallis.....	63
Tabela 9 – Resultados da regressão linear entre tempo, tratamento e temperatura	75
Tabela 10 – Estatísticas descritivas das temperaturas registradas .....	77
Tabela 11 – Resultados da comparação estatística das ferramentas .....	80
Tabela 12 – Ferramenta sem tratamento .....	83
Tabela 13 – Ferramenta com tratamento 1_300 .....	84

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	porcentagem
°	graus
$\mu\text{m}$	micrómetro
°C	graus Celsius
$h$	penetração da ferramenta [ $\mu\text{m}$ ]
<i>HRC</i>	dureza Rockwell
<i>K</i>	kelvin
$V_c$	velocidade de corte em m/min
$a_e$	profundidade de corte lateral em mm
$a_p$	profundidade de corte axial em mm
$f_z$	avanço por gume em mm/gume
<i>kW</i>	quilowatts
<i>m / min</i>	metros por minuto
<i>m/s</i>	metros por segundo
<i>min</i>	minutos
<i>mm/gume</i>	milímetros por gume
<i>mm</i>	milímetro
<i>n</i>	rotação
$r_n$	raio do gume [ $\mu\text{m}$ ]
<i>rpm</i>	rotações por minuto
<i>s</i>	segundos

## LISTA DE ABREVIATURAS

3D	Tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute (Instituto Americano de Ferro e Aço)
PPGMEC	Programa de Pós Graduação de Engenharia Mecânica
UCS	Universidade de Caxias do Sul

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	11
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo geral	14
1.2.2	Objetivos específicos	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>15</b>
2.1	FRESAMENTO	15
2.1.1	Tipos de fresamento	15
2.1.2	Fresamento de topo reto	17
2.1.3	Geometria de gume	20
2.2	TRATAMENTO DA FERRAMENTA	23
2.2.1	Polimento da ferramenta	26
2.3	TEMPERATURA NO PROCESSO DE FRESAMENTO	27
2.3.1	Balço energético	28
2.3.2	Medições de temperatura da ferramenta	31
2.3.3	Formas de medição de temperatura	32
2.3.4	Medição por pirômetro de duas cores com fibra ótica	33
2.3.5	Medição por câmera infravermelha	34
2.3.6	Medição por termopar inserido na ferramenta	35
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>42</b>
3.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DA METODOLOGIA	42
3.2	FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES	43
3.3	CONDIÇÕES DE USINAGEM	44
3.3.1	Parâmetros de corte	44
3.3.2	Ferramenta	44
3.3.3	Polimento da ferramenta	45
3.3.4	Corpo de prova	46
3.4	INSTRUMENTAÇÃO	47
3.4.1	Centro de usinagem	47
3.4.2	Embutimento de termopares no corpo de prova	48
3.4.3	Medição de temperatura por termopar inserido na peça	49

<b>3.4.4</b>	<b>Embutimento de termopar às ferramentas</b> .....	<b>51</b>
<b>3.4.5</b>	<b>Medição de temperatura por termopar inserido na ferramenta</b> .....	<b>52</b>
<b>3.4.6</b>	<b>Medição de temperatura por câmera termográfica</b> .....	<b>54</b>
<b>3.5</b>	<b>PREPARAÇÃO PARA USINAGEM</b> .....	<b>55</b>
<b>3.6</b>	<b>DADOS DE ENTRADA E SAÍDA</b> .....	<b>56</b>
<b>3.7</b>	<b>ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS</b> .....	<b>57</b>
<b>3.7.1</b>	<b>Estatísticas descritivas</b> .....	<b>57</b>
<b>3.7.2</b>	<b>Teste de normalidade</b> .....	<b>57</b>
<b>3.7.3</b>	<b>Comparação das temperaturas entre tratamentos</b> .....	<b>58</b>
<b>3.7.4</b>	<b>Evolução temporal das temperaturas</b> .....	<b>58</b>
<b>3.7.5</b>	<b>Teste ANOVA/Kruskal-Wallis</b> .....	<b>59</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>60</b>
<b>4.1</b>	<b>MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR TERMOPAR INSERIDO NA PEÇA</b> ....	<b>61</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Consequências da análise</b> .....	<b>62</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Comparação das temperaturas entre tratamentos</b> .....	<b>62</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Discussões</b> .....	<b>66</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Análise da variação da temperatura ao longo do corte</b> .....	<b>67</b>
<b>4.1.5</b>	<b>Avaliação crítica dos resultados</b> .....	<b>70</b>
<b>4.1.6</b>	<b>Teste ANOVA/Kruskal-Wallis</b> .....	<b>71</b>
<b>4.1.7</b>	<b>Avaliação crítica dos resultados</b> .....	<b>73</b>
<b>4.1.8</b>	<b>Regressão linear múltipla</b> .....	<b>74</b>
<b>4.1.9</b>	<b>Avaliação crítica dos resultados</b> .....	<b>76</b>
<b>4.2</b>	<b>MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR TERMOPAR INSERIDO NA FERRAMENTA</b> .....	<b>77</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Discussão e interpretação dos resultados</b> .....	<b>79</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Análise estatística da comparação das ferramentas de usinagem</b> .....	<b>80</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Discussão e interpretação dos resultados</b> .....	<b>81</b>
<b>4.3</b>	<b>MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR CÂMERA TERMOGRÁFICA</b> .....	<b>82</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Discussões e interpretação de resultados</b> .....	<b>91</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>93</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>96</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo essencial na indústria moderna, permitindo a fabricação de peças com alto grau de precisão e acabamento, com rugosidade típica  $R_a$  entre  $0,8 \mu\text{m}$  e  $3,2 \mu\text{m}$ , envolvendo desde componentes básicos até estruturas avançadas de alta tecnologia. Essa capacidade foi destacada por Cheng *et al.* (2023), que demonstraram como o fresamento eficiente de aços especiais assegura qualidade e reduz custos de produção.

Dentre os diversos métodos de usinagem, o fresamento se destaca por sua versatilidade na geração de formas complexas e geometrias precisas em larga escala, aliando alta produtividade a tempos de ciclo reduzidos. Essa eficiência foi comprovada por Devi *et al.* (2023), quem demonstraram os benefícios do fresamento com ferramentas tratadas criogenicamente na usinagem de superligas.

Dentre as variáveis de saída do processo de fresamento a temperatura é um fator crítico pois máquinas e ferramentas submetidas a altas temperaturas durante o fresamento apresentam redução de vida útil da ferramenta, aumento de custos e alteração das características materiais da peça final. Por exemplo, Meng *et al.* (2023) estudaram a relação entre temperatura na interface ferramenta–cavaco e desgaste, evidenciando que o controle térmico é determinante para estabilidade e produtividade.

Neste contexto, este trabalho avalia a influência do tratamento do gume da ferramenta sobre a temperatura durante o fresamento, utilizando medições termométricas específicas para validar a hipótese de redução de calor com ferramentas tratadas. Os ensaios foram realizados em fresamento de topo reto com ferramentas de metal duro, aplicadas sobre corpos de prova de aço AISI P20 (42CrMo7).

### 1.1 JUSTIFICATIVA

A relevância deste estudo é ilustrada pelo fato de que uma parcela significativa da cadeia de manufatura depende da usinagem — um estudo recente estimou que aplicações com fresamento representam cerca de 15% do valor agregado em componentes mecânicos globais. Ademais, a crescente demanda por processos com menor impacto ambiental, como usinagem a seco ou *near-dry*, intensifica a

necessidade de técnicas eficazes para monitoramento térmico in loco (Cheng *et al.*, 2023; Devi *et al.*, 2023).

O comportamento térmico também influencia diretamente a força de corte, a resistividade superficial e o tempo de vida da ferramenta (Wang *et al.*, 2023). Estudos modernos baseados em modelagens com diferentes geometrias de aresta confirmam que o formato do gume altera significativamente a geração e condução térmica durante o fresamento (Zhu *et al.*, 2023). Isso reforça a necessidade de compreender a relação entre o acabamento do gume e o desempenho térmico da operação.

Desde os clássicos de Taylor (1907), sabe-se que existe uma relação direta entre velocidade de corte, desgaste e temperatura da ferramenta. Mais recentemente, os avanços em medição térmica de precisão permitiram avaliações em tempo real que associam rugosidade de aresta e perfil térmico da ferramenta (Meng *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023).

O controle eficaz da geração de calor e sua dissipação não apenas prolonga significativamente a vida útil da ferramenta, como também contribui para um melhor acabamento superficial e a diminuição de falhas por tensões térmicas residuais. Esta constatação foi comprovada por Wang *et al.* (2023), que demonstraram que o uso de geometrias de aresta otimizadas mantém temperaturas de corte mais baixas e estáveis, resultando em superfície com menor rugosidade e melhores propriedades residuais, diretamente correlacionadas ao desempenho térmico melhorado.

A hipótese inicial de pesquisa associada a este trabalho parte do princípio de que o tratamento de gume das ferramentas reduz a temperatura de corte na região de interface ferramenta/peça, impactando positivamente no seu desempenho.

As informações anteriores ressaltam a relevância de controlar a temperatura nos processos de usinagem e evidenciam a necessidade contínua de desenvolver técnicas que reduzam os níveis térmicos gerados pelo corte. No entanto, permanece a seguinte questão: é possível estabelecer uma correlação direta entre o tratamento do gume da ferramenta e a diminuição da temperatura da ferramenta ou da peça? Caso exista, essa correlação se apresenta de forma suficientemente significativa para validar a hipótese inicial deste trabalho?

Para responder a essas perguntas, este estudo realiza uma análise comparativa entre ferramentas de fresamento com tratamento de gume e sem polimento, por meio de experimentos laboratoriais e medições de temperatura em pontos específicos, utilizando os métodos mais adequados selecionados.

Estudos recentes confirmam o impacto da preparação do gume sobre o comportamento térmico na usinagem. Pérez-Salinas *et al.* (2023) investigaram, via *drag-finishing*, o polimento do gume em ferramentas de brochamento de Inconel 718, constatando que o polimento altera a distribuição de temperatura e reduz os picos térmicos durante o processo. De forma semelhante, Zhou, Wang e LV (2024) demonstraram que o preparo do gume por *drag-finishing* reduz a rugosidade em até 42 % e melhora a geometria, o que é esperado ter impacto direto na dissipação térmica.

Além disso, uma revisão recente sobre preparação do gume (Zhou, 2023) destaca que técnicas como *drag-finishing* e eletropolimento seco melhoram a qualidade das ferramentas, promovendo menor atrito e menor geração de calor durante a usinagem.

Dessa forma, fundamentando-se nesses estudos, este trabalho busca avaliar experimentalmente se os efeitos gerados pelo tratamento se refletem em diminuição de temperatura durante o fresamento. A comparação entre métodos termométricos (termopar na ferramenta, na peça e termografia) permitirá avaliar se a microgeometria da ferramenta influencia realmente a dissipação térmica, confirmando ou refutando a hipótese de que o polimento reduz o aquecimento na interface ferramenta/peça.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Compreender o efeito do tratamento do gume da ferramenta sobre a temperatura de usinagem.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Do objetivo geral derivam-se os específicos como sendo:

- a) realizar um levantamento a respeito das formas de medição de temperatura de ferramentas no processo de fresamento;
- b) avaliar e selecionar as formas mais adequadas para a implementação do sistema de medição;
- c) verificar a influência da medição da temperatura na peça;
- d) verificar a influência da medição da temperatura na ferramenta;
- e) analisar as variações de temperatura no processo de corte através de termografia; e
- f) analisar resultados obtidos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FRESAMENTO

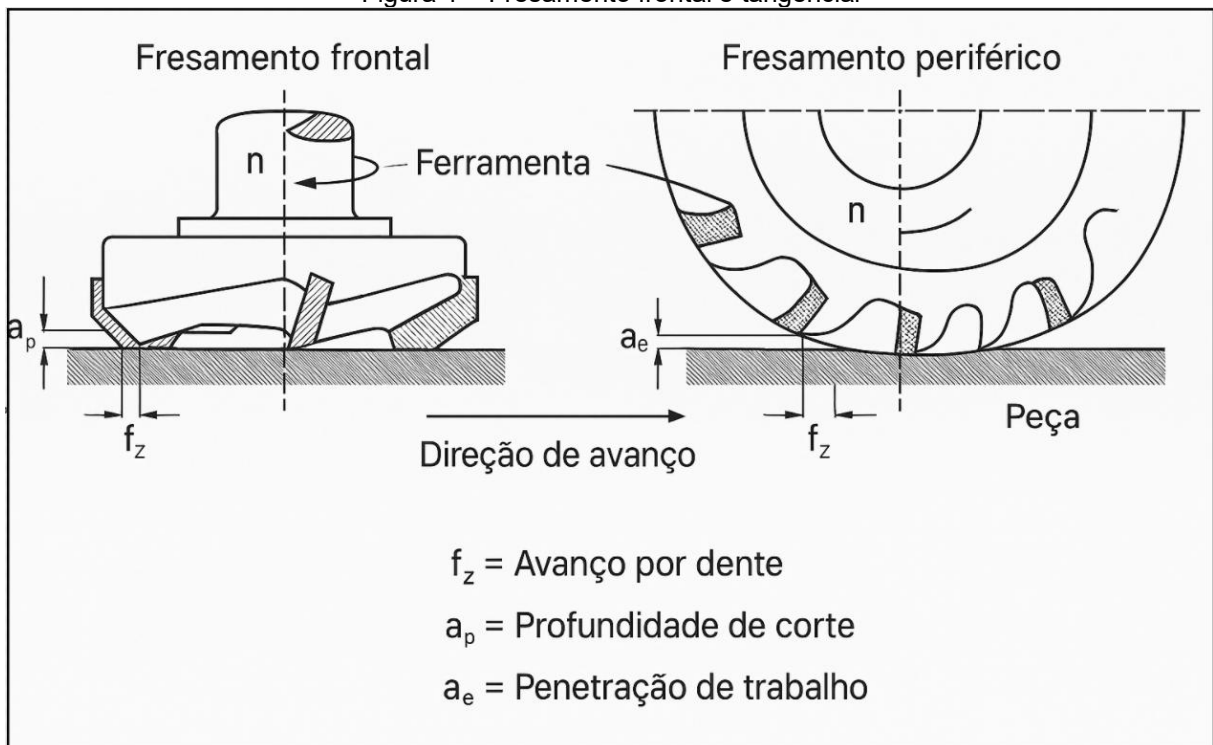
O processo de fresamento envolve a remoção controlada de material de uma peça bruta para criar superfícies, contornos ou ranhuras com precisão. Isso é feito por meio de uma máquina fresadora, que utiliza uma ferramenta rotativa denominada fresa. Durante o fresamento, a peça a ser trabalhada é fixada em uma mesa de trabalho, enquanto a fresa gira em alta velocidade. A ferramenta se move em relação à peça, removendo pequenas quantidades de material em cada passagem da fresa. Dependendo da aplicação, o fresamento pode ser realizado de duas formas principais: no fresamento periférico, os dentes da fresa cortam ao longo das bordas da peça, enquanto no fresamento frontal, o corte é feito pela extremidade da ferramenta. A combinação de movimentos precisos da mesa e da rotação da fresa permite a criação de formas complexas com exatidão (Rebeyka, 2016).

A versatilidade do fresamento é uma de suas maiores vantagens na fabricação, permitindo a produção de peças complexas e detalhadas com alta precisão. Essa técnica pode ser aplicada a uma ampla variedade de materiais, como metais, plásticos e madeiras, o que a torna ideal para diversos setores industriais, desde a produção de componentes automotivos até peças aeronáuticas (Ferraresi, 1970; Diniz *et al.*, 1999).

#### 2.1.1 Tipos de fresamento

Os dois principais tipos de fresamento, o fresamento frontal e o fresamento tangencial (ou periférico), diferem na forma como o material é removido e na posição dos dentes da ferramenta. No fresamento frontal, a remoção de material ocorre na extremidade da fresa, e o corte é feito com os dentes posicionados na parte inferior da ferramenta (Ferraresi, 1970; Diniz *et al.*, 1999). Esse método é aplicado para aplainar superfícies e criar cavidades, proporcionando um acabamento superficial uniforme (Stemmer, 2008). A Figura 1 ilustra a distinção entre os dois métodos de fresamento.

Figura 1 – Fresamento frontal e tangencial



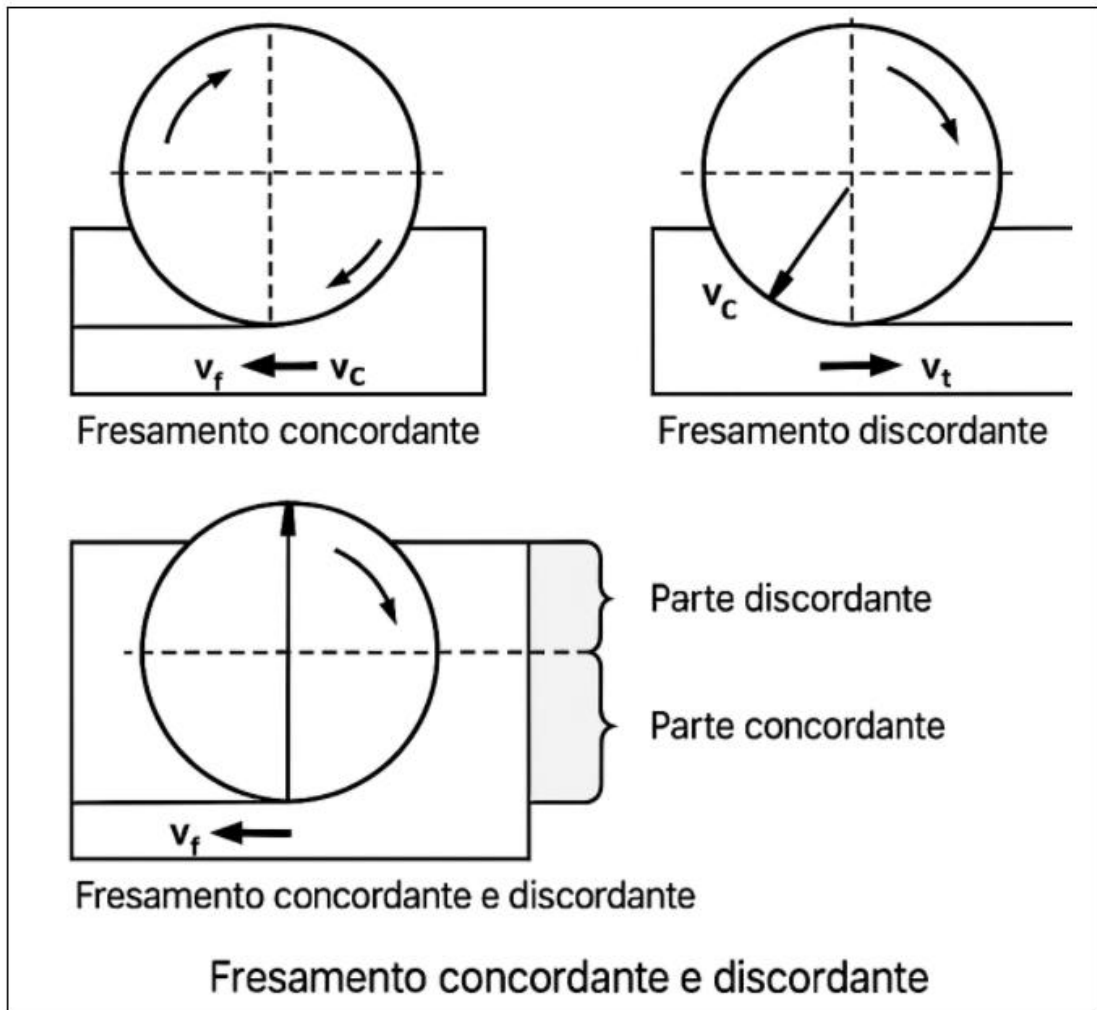
Fonte: Klocke (2011).

Já no fresamento tangencial, os dentes da fresa estão localizados ao longo da periferia da ferramenta, e o corte ocorre lateralmente à peça de trabalho. Esse tipo é mais indicado para a usinagem de perfis e ranhuras profundas, permitindo maior remoção de material e maior eficiência em operações lineares. Ambos os métodos podem ser combinados para maximizar a precisão e a produtividade, dependendo das exigências da peça a ser fabricada (Stemmer, 2008; Diniz *et al.*, 1999).

O fresamento pode ser realizado de duas formas distintas: o fresamento concordante e o fresamento discordante, cada um com características e aplicações específicas. No fresamento concordante, o movimento de rotação da fresa é no mesmo sentido do avanço da peça, o que resulta em uma remoção de material mais suave, menor esforço sobre a ferramenta e melhor acabamento superficial. Esse método é preferido quando se busca alta precisão dimensional e um bom acabamento, porém, pode gerar uma força de empuxo maior sobre a peça, exigindo uma fixação mais robusta. Já no fresamento discordante, a rotação da fresa é contrária ao sentido do avanço da peça, proporcionando uma maior agressividade no corte inicial. Embora cause mais vibrações e desgaste mais rápido da ferramenta, o fresamento discordante pode ser vantajoso em casos onde se precisa cortar camadas mais grossas de material ou quando há superfícies com oxidação ou impurezas, que

são removidas no início do processo. A escolha entre esses dois métodos depende das características da peça, da máquina e da qualidade final desejada (Stemmer, 2008; Diniz *et al.*, 1999). A Figura 2 ilustra os diferentes tipos de movimentos de concordância possíveis.

Figura 2 – Movimentos de concordância



Fonte: Klocke (2011).

### 2.1.2 Fresamento de topo reto

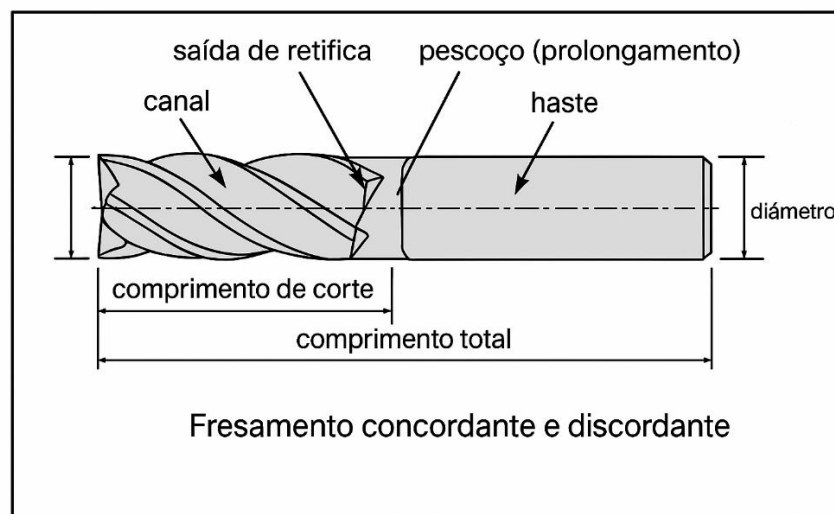
O fresamento de topo reto é uma técnica de usinagem que utiliza uma fresa com extremidade plana para realizar cortes precisos e uniformes em superfícies planas. Esse tipo de fresa é ideal para operações de desbaste e acabamento, pois permite a criação de contornos retos, cavidades e rebaxos com grande precisão. A fresa de topo reto, ao contrário das fresas de topo esférico, possui gumes cortantes dispostos em ângulos retos, o que facilita a remoção de grandes volumes de material

em operações mais agressivas. Além disso, essa técnica é amplamente utilizada em indústrias como a metalúrgica e a de moldes, onde a produção de superfícies planas e detalhes bem definidos é fundamental para a qualidade do produto (Fracaro, 2017). O fresamento de topo reto também oferece boa flexibilidade, podendo ser aplicado em diferentes materiais, desde ligas metálicas até plásticos (Stemmer, 2008).

A relação entre o comprimento e o diâmetro da fresa de topo é um fator crucial que afeta diretamente a estabilidade, a precisão e a eficiência do processo de fresamento. Uma fresa de topo com um diâmetro maior em relação ao seu comprimento tende a ser mais rígida, o que minimiza vibrações e proporciona um corte mais preciso, ideal para operações de desbaste e acabamento em materiais duros. No entanto, quando o comprimento da fresa é maior em relação ao diâmetro, a ferramenta se torna mais flexível, o que pode resultar em deflexão e vibração excessiva, prejudicando a qualidade do corte e o acabamento superficial (Klocke, 2009).

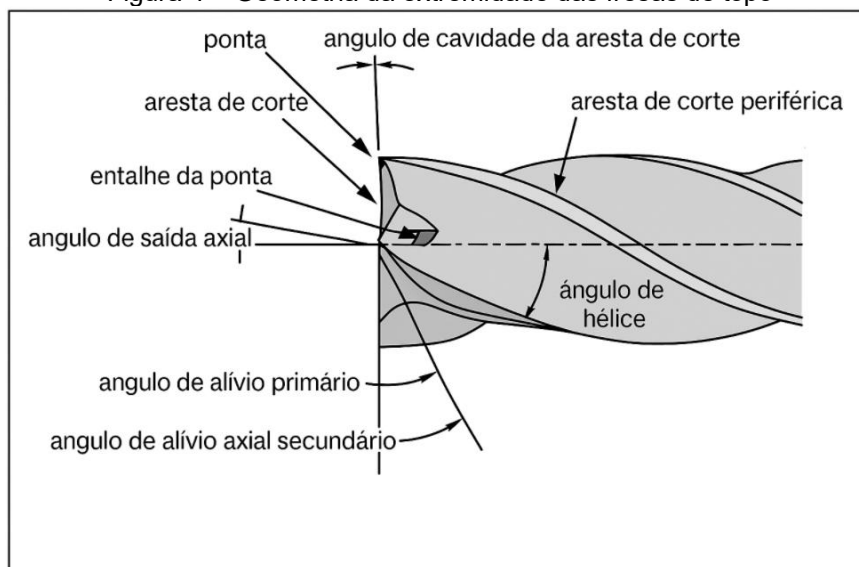
Para garantir rigidez e precisão no fresamento, recomenda-se manter a relação entre comprimento e diâmetro da ferramenta o mais curta possível, idealmente próxima de 3:1. Relações acima de 4:1 exigem ajustes nos parâmetros para evitar vibrações, enquanto valores superiores a 8:1 são críticos e só devem ser usados com estratégias específicas. O ajuste adequado dessa relação é essencial para equilibrar a produtividade e a qualidade no processo de usinagem (Stemmer, 2008). A nomenclatura e as características deste tipo de fresa estão detalhadas na Figura 3

Figura 3 – Terminologia das fresas de topo



A geometria da extremidade das fresas de topo, que poder ser observada na Figura 4, desempenha um papel crucial na eficiência do processo de usinagem e na qualidade do acabamento superficial das peças. As fresas de topo podem apresentar diferentes formatos de extremidade, como plana, esférica ou chanfrada, cada uma adequada a aplicações específicas. A fresa de topo plana, por exemplo, é ideal para operações de desbaste e acabamento em superfícies planas, enquanto a fresa de topo esférica é utilizada para contornos e cavidades, permitindo um acesso mais fácil a áreas de difícil alcance. Já a fresa chanfrada é eficaz para criar bordas angulares e rebaiços. Além disso, a angulação e a afiação dos gumes cortantes influenciam diretamente na força de corte, na resistência ao desgaste e na remoção de material, sendo fatores essenciais para otimizar produtividade e precisão no fresamento. Ângulos de ataque positivos reduzem a força de corte e facilitam a formação do cavaco, diminuindo o atrito e a geração de calor, enquanto ângulos negativos aumentam a robustez do gume, mas elevam a força de corte e o desgaste. Já o ângulo de saída afeta a evacuação do cavaco: valores maiores favorecem o escoamento, reduzindo riscos de obstrução. A seleção da geometria deve considerar o material da peça, a profundidade de corte, a estratégia de usinagem (desbaste ou acabamento) e a rigidez do sistema. Para materiais duros ou cortes pesados, recomenda-se ângulos menores e gumes reforçados; para acabamentos finos, ângulos positivos e arestas bem afiadas proporcionam menor rugosidade e melhor dissipação térmica (REBEYKA, 2016).

Figura 4 – Geometria da extremidade das fresas de topo



Fonte: Rebeyka (2016).

As fresas de topo destacadas na Figura 5 estão disponíveis em uma variedade de tipos de ponta, cada uma projetada para atender a necessidades específicas de usinagem.

Figura 5 – Exemplos de fresas de topo reto

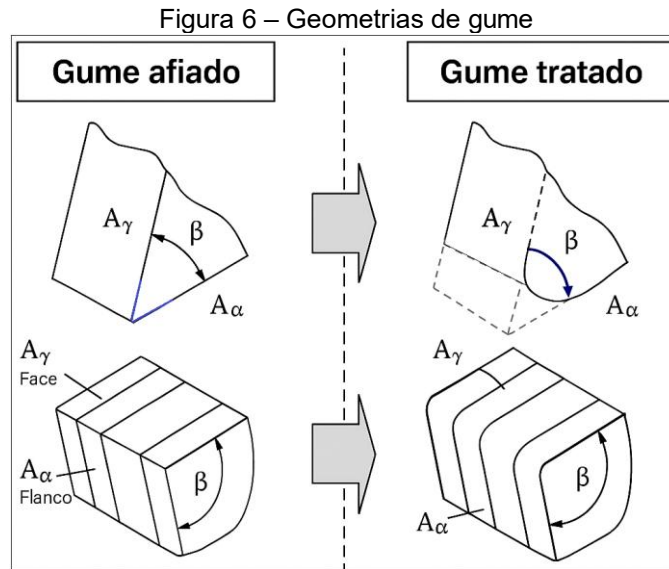


Fonte: Adaptado de World Tools (2022).

### 2.1.3 Geometria de gume

A geometria do gume da fresa, conforme ilustra a Figura 6, desempenha um papel fundamental nas forças envolvidas no processo de fresamento, influenciando diretamente o desempenho da usinagem e a eficiência do corte (Denkena *et al.*, 2012). Um gume bem projetado pode otimizar a distribuição das forças durante a operação, reduzindo a resistência ao corte e, conseqüentemente, a força necessária para a remoção do material (Zeilmann; Bordin, 2014).

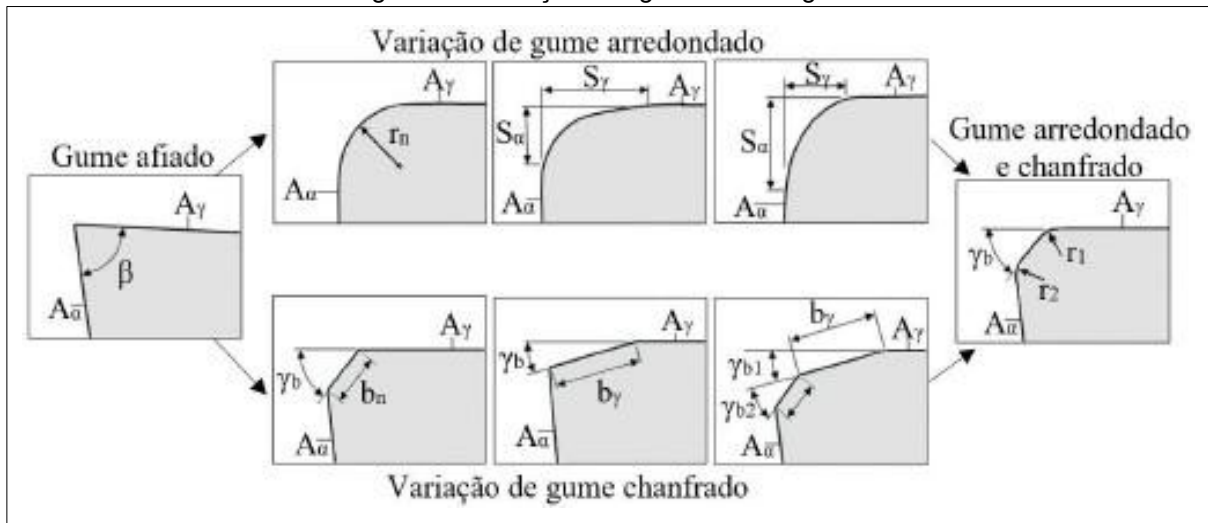
O ângulo do gume da ferramenta, que pode ser positivo, negativo ou reto, determina a forma como o cavaco se desprende do material durante a usinagem. Um ângulo de gume positivo, por exemplo, facilita a remoção do cavaco, permitindo que ele flua suavemente para longe da zona de corte, o que minimiza o atrito e a geração de calor. Isso resulta em uma usinagem mais eficiente e em um acabamento superior. Por outro lado, ângulos de gume negativos podem dificultar o escoamento do cavaco, levando a um acúmulo de material na área de corte, o que pode causar problemas como o aumento do desgaste da ferramenta e a deterioração da qualidade da peça (Klocke, 2009).



Fonte: Adaptado de Rodríguez (2009).

A Figura 7 apresenta as diferentes afiações e geometrias do gume das fresas de topo, as quais são essenciais para otimizar o desempenho no processo de usinagem, pois cada configuração é projetada para atender a requisitos específicos de corte e características do material a ser trabalhado. A afiação do gume envolve a definição de diferentes ângulos, como os de ataque, corte e saída, que influenciam diretamente a eficiência do corte, o desgaste da ferramenta e a qualidade do acabamento superficial (Rebeyka, 2016). Uma adequada geometria de gume nas fresas de topo melhora a eficiência do corte, reduz a força necessária e prolonga a vida útil da ferramenta, diminuindo custos de substituição. Além de garantir um acabamento mais suave e uniforme, essa geometria facilita a dissipação do calor e o escoamento do cavaco, minimizando problemas de usinagem (Diniz *et al.*, 1999).

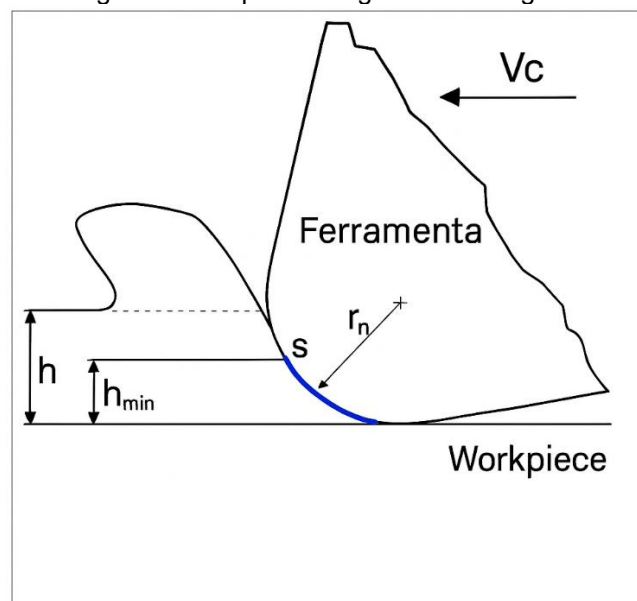
Figura 7 – Variações de geometria de gume



Fonte: Adaptado de Rodríguez (2009).

Rodríguez (2009) relata que a relação entre o raio do gume ( $r_n$ ) e a penetração ( $h$ ) durante o fresamento tem um impacto significativo na temperatura da ferramenta. Quando o raio do gume é maior, isso tende a aumentar a área de contato entre a ferramenta e o material a ser usinado, resultando em um aumento da força de corte e, conseqüentemente, na geração de mais calor. A penetração ( $h$ ) refere-se à profundidade de corte, e quando a penetração é maior, a quantidade de material removido em uma única passada da ferramenta aumenta, o que também contribui para um aumento na temperatura. Essa relação pode ser verificada através da Figura 8.

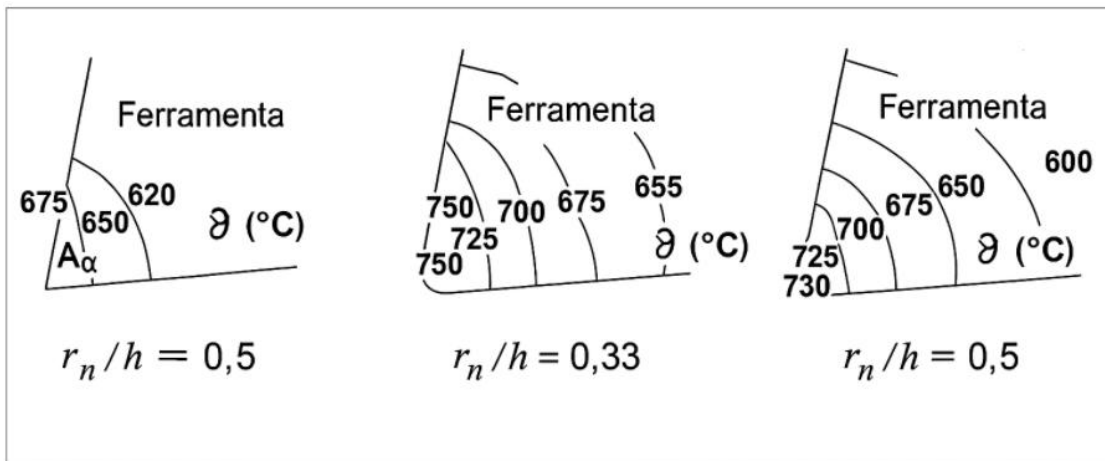
Figura 8 – Esquema de geometria do gume



Fonte: Adaptado de Rodríguez (2009).

A variação da relação  $r_n/h$  demonstrada na Figura 9 tem um impacto significativo nas condições térmicas durante o processo de fresamento, afetando a distribuição da temperatura na ferramenta de corte. Quando essa relação é muito menor que 1 indica que o raio do gume  $r_n$  é pequeno em relação à profundidade de penetração  $h$ . Nesse caso, as temperaturas mais elevadas tendem a se concentrar na face da ferramenta, o que pode resultar em um aumento do desgaste nessa área devido ao calor gerado. Quando a relação se aproxima de 1, a temperatura tende a se concentrar no gume de corte. Isso acontece porque a área de contato entre a ferramenta e o material aumenta, o que eleva a resistência ao corte e, como resultado, gera mais calor nessa região (Rodríguez, 2009).

Figura 9 – Temperatura interna da ferramenta para diferentes razões



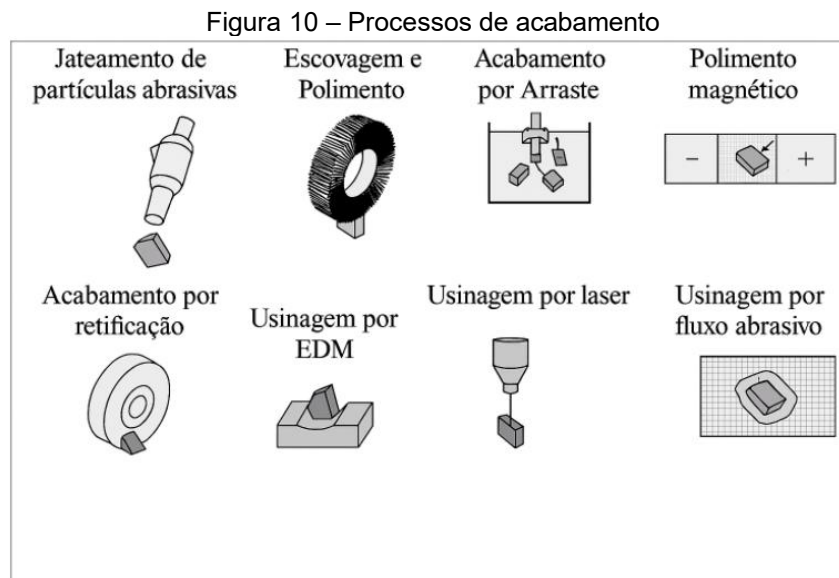
Fonte: Kim *et al.* (1999).

Por fim, quando a relação  $r_n/h$  se torna muito maior que 1b, isso indica que o raio do gume é significativo em comparação à profundidade de penetração. Nesse cenário, as temperaturas mais altas se deslocam para o flanco da ferramenta. Isso pode resultar em um aumento do desgaste na lateral da fresa, afetando a estabilidade do corte e a precisão da usinagem (Uhlmann *et al.*, 2016).

## 2.2 TRATAMENTO DA FERRAMENTA

O tratamento do gume da ferramenta é uma etapa crucial na preparação e manutenção das ferramentas de corte, especialmente em processos como o fresamento, e visa melhorar suas propriedades mecânicas, aumentando durabilidade, resistência ao desgaste e desempenho geral durante a usinagem (Zeilmann; Bordin, 2014).

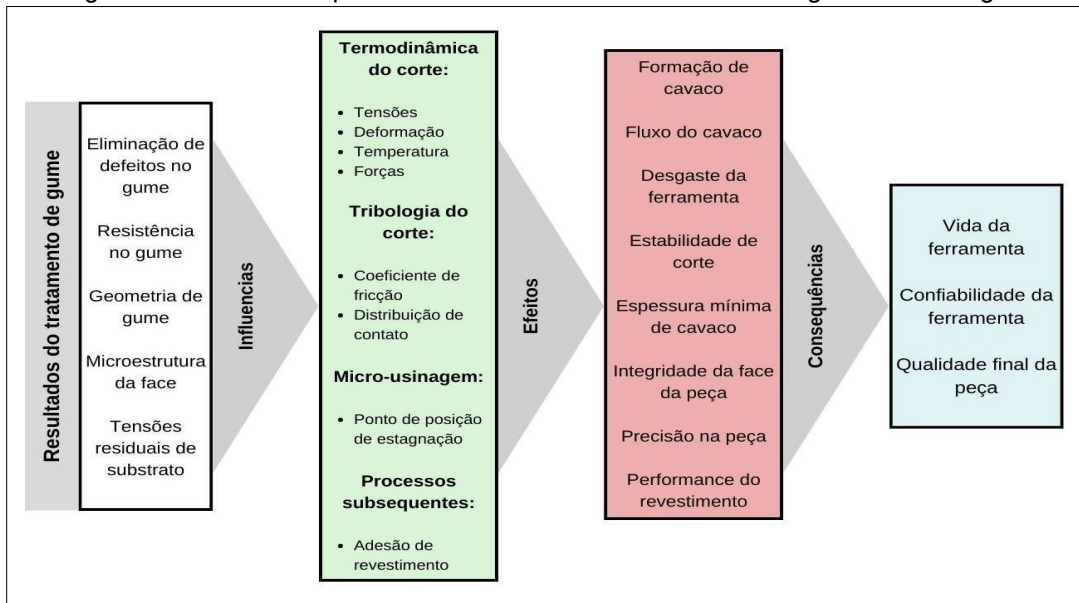
Rodríguez (2009) aponta que o tratamento das arestas de corte visa minimizar o desgaste, prolongando a vida útil da ferramenta, e reduzir o atrito entre a ferramenta e o material usinado, melhorando a eficiência do corte e diminuindo a geração de calor, que pode causar desgaste térmico. É igualmente importante que o gume mantenha uma boa tenacidade, permitindo resistência a choques e impactos, enquanto proporciona um corte mais limpo e preciso, resultando em um acabamento superficial superior. O tratamento também facilita o escoamento do cavaco, reduzindo o risco de obstruções, e aumenta a versatilidade da ferramenta, permitindo sua utilização em uma variedade maior de materiais e condições de corte. Na Figura 10 podem ser observados os diversos tipos de tratamento de gume existentes.



Fonte: Ost (2016).

A influência do tratamento de gume na usinagem está sendo esquematizada pela Figura 11.

Figura 11 – Cadeia sequencial de influências do tratamento de gume na usinagem



Fonte: Adaptado de Rodríguez (2009).

A importância do tratamento de gume para ferramentas de corte está amplamente comprovada na literatura técnica e científica, principalmente por seus benefícios quanto à eficiência térmica, durabilidade e qualidade do processo. Um estudo de revisão publicado em 2024 por Zhou *et al.* destacou que métodos como acabamento por arraste, eletropolimento a seco e microchanfragem removem defeitos na aresta (como rebarbas) e resultam em microgeometrias que reduzem significativamente a geração de calor e melhoram a vida útil da ferramenta.

Complementando, Zhao, Qin e Feng (2021) demonstraram por meio de simulações de elementos finitos que a otimização do fator de forma da aresta de corte reduz os picos de temperatura no fresamento, promovendo maior estabilidade térmica e menor desgaste.

Riu-Perdrix *et al.* (2024) apresentaram, por meio de eletropolimento a seco em microfresas, uma redução expressiva na rugosidade do gume, o que se traduz em melhor dissipação térmica graças à menor fricção na interface entre ferramenta e peça.

Além disso, Zhou, Wang e Lv (2024) verificaram que o acabamento por arraste melhora a geometria do gume, diminuindo a geração de calor durante operações de fresamento, conforme evidenciado por ensaios combinados com simulação baseada em método dos elementos discretos.

Esses resultados mostram que o tratamento do gume não apenas prolonga a vida útil da ferramenta, mas também melhora o controle térmico, reduzindo a formação

de tensões térmicas residuais e elevando a qualidade superficial e a precisão dimensional, substanciando a pertinência da investigação proposta nesta dissertação.

### **2.2.1 Polimento da ferramenta**

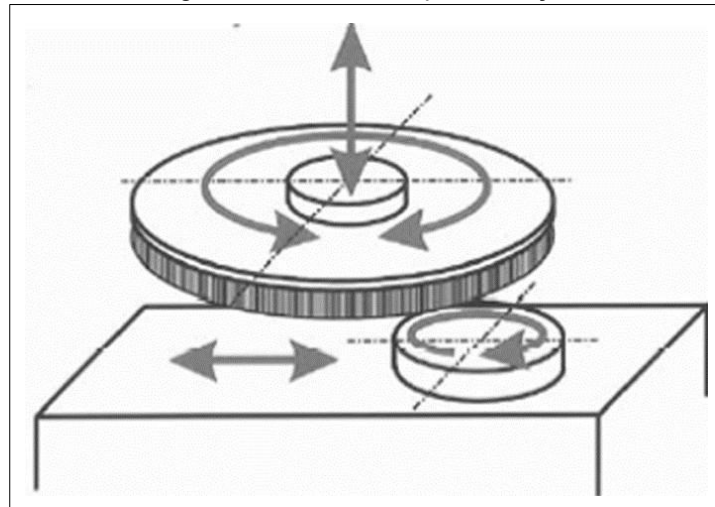
Uma das principais funções do polimento é a redução da rugosidade da superfície do gume. Superfícies mais lisas minimizam o atrito entre a ferramenta e o material a ser usinado, o que, por sua vez, ajuda a reduzir a geração de calor durante o corte. A redução de calor pode implicar em menor risco de desgaste térmico e, portanto, uma vida útil mais longa da ferramenta (Tikal, 2009 *apud* Ost, 2016).

Além disso, o polimento pode contribuir para um melhor escoamento dos cavacos, evitando obstruções e facilitando a evacuação dos resíduos gerados durante o processo de usinagem. Isso é particularmente importante em operações de corte mais exigentes, onde a remoção eficiente dos cavacos é essencial para manter a qualidade do corte e evitar falhas na ferramenta (Klocke, 2009).

O método de polimento por escovamento é uma técnica amplamente utilizada para melhorar a qualidade da superfície de ferramentas de corte e outros componentes metálicos. Esse processo envolve o uso de escovas, que podem ser feitas de diferentes materiais, como nylon, metal ou cerâmica, para remover impurezas, rebarbas e irregularidades da superfície da peça a ser polida (Klocke, 2009). O equipamento pode ser manual ou automatizado, e a escova é movida sobre a superfície em padrões controlados, aplicando uma pressão adequada

O polimento de escovamento por oscilação ilustrado na Figura 12 é uma técnica avançada que combina o movimento oscilatório da escova com o movimento linear ou rotacional da peça a ser polida. Esse método é particularmente eficaz para alcançar acabamentos de alta qualidade em superfícies complexas e detalhadas, uma vez que a oscilação permite que a escova penetre em áreas de difícil acesso e contornos intrincados (Tikal, 2009).

Figura 12 – Polimento por oscilação



Fonte: Tikal (2009).

De acordo com os resultados obtidos por Zeilmann e Bordin (2014) em seu estudo sobre ferramentas afiadas, constatou-se que durante o processo de furação a seco, as ferramentas que passaram por polimento apresentaram as menores temperaturas. Além disso, essas ferramentas polidas mostraram uma redução menor na espessura da face em comparação com outras técnicas de acabamento. O polimento foi realizado utilizando uma esponja com filamentos abrasivos, fixada em um esmeril pneumático e manual, que promoveu um polimento eficiente da superfície crua da ferramenta.

### 2.3 TEMPERATURA NO PROCESSO DE FRESAMENTO

A temperatura no processo de usinagem é um fator crítico que afeta a eficiência, a qualidade do acabamento superficial e a vida útil das ferramentas. O aumento da temperatura pode levar a uma série de problemas, incluindo desgaste acelerado da ferramenta, alteração das propriedades mecânicas do material usinado e degradação da qualidade da peça acabada. Vários autores abordam a influência da temperatura no processo de usinagem.

Lima (2007) destaca que a temperatura gerada durante a usinagem é resultado da combinação do atrito entre a ferramenta e a peça, além do calor gerado pela deformação do material durante o corte. Ele enfatiza que temperaturas excessivas podem causar danos térmicos à ferramenta, como trincas e desgaste acelerado.

Diniz *et al.* (1999) observam que a escolha do material da ferramenta e sua geometria têm um impacto significativo nas temperaturas de usinagem. Ferramentas com melhor capacidade de dissipação de calor podem ajudar a controlar a temperatura, reduzindo o risco de desgaste térmico e melhorando a vida útil da ferramenta.

Rodríguez (2009) acrescenta que o uso de fluidos de corte adequados é essencial para a gestão da temperatura durante a usinagem. Fluidos de corte não apenas ajudam a reduzir a temperatura, mas também proporcionam lubrificação, o que minimiza o atrito e melhora a eficiência do processo.

Outros autores discutem a importância do controle da temperatura em processos de usinagem avançada, como o fresamento de alta velocidade. Eles apontam que técnicas de monitoramento térmico, como sensores infravermelhos, podem ser utilizadas para acompanhar as temperaturas em tempo real, permitindo ajustes dinâmicos no processo para otimizar o desempenho.

### **2.3.1 Balanço energético**

O balanço energético no processo de usinagem é uma consideração fundamental que envolve a análise da energia consumida durante a operação em relação à energia dissipada em forma de calor, atrito e deformação do material. Este balanço é essencial para otimizar a eficiência dos processos de usinagem e minimizar o desperdício de energia.

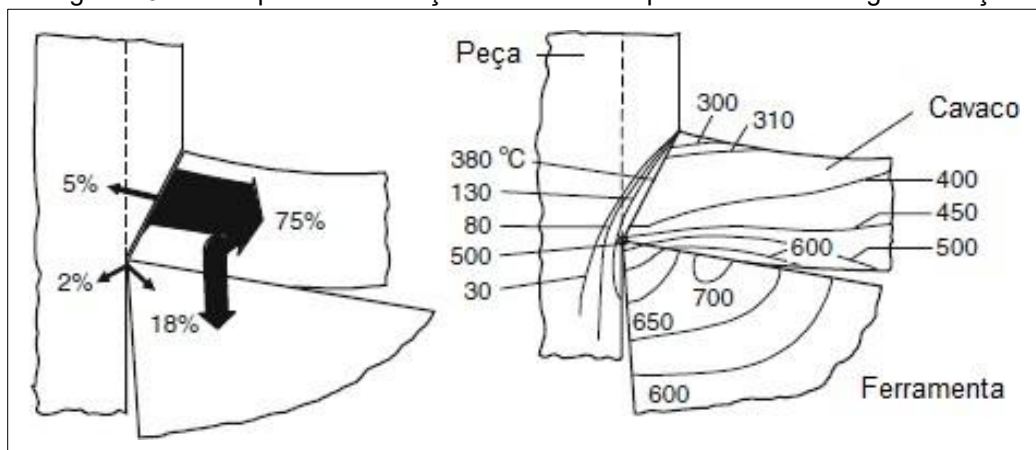
Os principais fatores na geração de calor no processo de fresamento incluem o atrito entre a ferramenta e a peça, a deformação plástica do material, a resistência do fluido de corte e a transferência de calor. O atrito gerado durante o corte é uma das principais causas do aquecimento, contribuindo significativamente para a temperatura da ferramenta e da peça (Ferraresi, 1970; Diniz *et al.*, 1999). Além disso, a deformação plástica do material gera calor devido à energia de deformação, sendo este efeito amplificado pela dureza do material e pelas condições de corte (Diniz *et al.*, 1999). O movimento rotativo da ferramenta em alta velocidade também gera calor, influenciando a precisão do fresamento e a vida útil da ferramenta (Rodríguez, 2009).

A geração de calor no processo de fresamento ocorre em diferentes partes do sistema: no cavaco, na peça usinada e na ferramenta, cada uma contribuindo de maneira distinta para o aumento da temperatura durante a usinagem, conforme ilustra

a Figura 13 (Klocke, 2011). Durante o corte, o cavaco é a principal entidade que dissipa calor, absorvendo a maior parte da energia gerada. O atrito entre o cavaco e a ferramenta, bem como a deformação plástica do material, resulta em aquecimento do cavaco. A peça também absorve uma parte significativa do calor gerado durante o fresamento, embora em menor proporção em comparação com o cavaco. O calor é transferido para a peça devido à condução e à fricção entre a superfície de corte e o material. Altas temperaturas na peça podem resultar em deformações térmicas, alterando suas propriedades mecânicas e afetando a precisão dimensional.

A ferramenta é outra fonte significativa de geração de calor durante o fresamento, recebendo uma parte do calor gerado na interface com o cavaco. A temperatura na ferramenta pode aumentar rapidamente devido ao atrito e à deformação durante o corte, especialmente nas regiões próximas ao gume de corte, conforme relata Trent (1988).

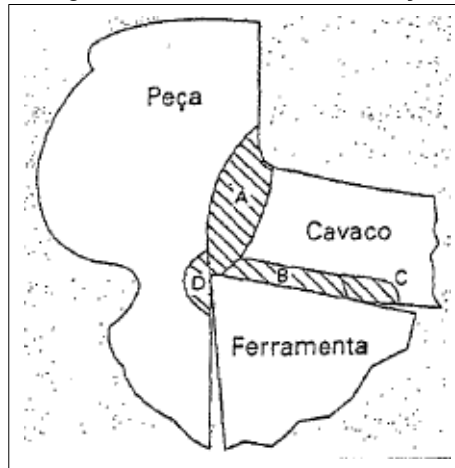
Figura 13 – Exemplo de distribuição de calor e temperaturas na usinagem de aço



Fonte: Adaptado de Klocke (2011).

No processo de fresamento, o calor gerado é distribuído em diferentes regiões, conforme destacado na Figura 14, cada uma contribuindo de maneira distinta para a temperatura total. As regiões A, B, C e D representam áreas específicas onde a geração de calor ocorre de maneira significativa, conforme discutido por diversos autores.

Figura 14 – Regiões de calor durante formação de cavacos



Fonte: Machado *et al.* (2015).

Na região A é onde ocorre a maior parte do calor gerado, devido ao intenso atrito entre o cavaco e a ferramenta durante o corte. Como mencionado por Klocke (2006), as temperaturas nessa interface podem ser extremamente elevadas, resultando em desgaste acelerado da ferramenta e comprometendo a qualidade do corte. O atrito gerado e a deformação plástica do material no cavaco levam à geração de calor, que afeta significativamente a eficiência do processo de usinagem.

Na face da ferramenta, região B, o calor é gerado devido à interação com a peça usinada. De acordo com Trent (1988), esta região também é suscetível ao aquecimento, pois a energia gerada pela deformação do material e pelo atrito é transferida para a ferramenta. A temperatura elevada nesta área pode afetar a integridade da ferramenta e resultar em falhas se não for adequadamente gerenciada.

Já na região C, o cavaco, sendo o material removido durante o fresamento, também desempenha um papel importante na geração de calor. Conforme discutido por Diniz *et al.* (1999), o cavaco absorve calor devido à fricção e à deformação durante o corte. A dissipação de calor nesta região é crucial para garantir que a temperatura do cavaco não afete negativamente o processo. A eficiência na remoção de calor pelo cavaco pode influenciar a qualidade do acabamento da peça usinada.

A peça usinada, região D, absorve calor gerado nas outras regiões, principalmente devido à condução térmica. O calor transferido para a peça pode resultar em deformações térmicas e afetar suas propriedades mecânicas. A gestão térmica nesta região é essencial para garantir a precisão dimensional e a qualidade da usinagem, evitando que o superaquecimento comprometa a integridade da peça (Diniz *et al.*, 1999).

Na interface entre o cavaco e o flanco da ferramenta, o calor é gerado principalmente devido ao atrito causado pelo movimento relativo entre a ferramenta e o cavaco. Como mencionado por Klocke (2006), as forças de corte aplicadas durante o processo provocam deformações plásticas no material do cavaco, resultando em uma quantidade significativa de energia térmica. Essa energia é concentrada nas superfícies de contato, elevando rapidamente a temperatura nessa região.

O aumento da velocidade de corte na indústria é uma estratégia eficaz para elevar a produtividade, permitindo a remoção de material em menos tempo. Essa abordagem pode resultar em acabamentos mais finos e precisos, mas deve ser implementada com cuidado, pois também acarreta desafios, como o aumento da temperatura gerada durante o corte, que pode levar ao desgaste acelerado da ferramenta e à necessidade de trocas mais frequentes, elevando os custos operacionais. Segundo Klocke (2006), a gestão térmica torna-se ainda mais crítica em altas velocidades, exigindo o uso de fluidos de corte adequados e técnicas de resfriamento eficazes para dissipar o calor e evitar deformações térmicas na peça usinada. Além disso, máquinas-ferramenta mais avançadas podem ser necessárias para suportar as condições operacionais exigentes. Portanto, otimizar os parâmetros de corte, selecionar ferramentas adequadas e implementar um controle térmico eficiente são essenciais para garantir que os benefícios do aumento da velocidade de corte superem os desafios associados, de acordo com Klocke (2006).

### **2.3.2 Medições de temperatura da ferramenta**

A medição de temperatura na usinagem é essencial para otimizar o processo, garantir a durabilidade da ferramenta e manter a qualidade da peça usinada, e existem diversas formas e métodos para isso. Os termopares são amplamente utilizados por sua simplicidade e baixo custo, embora possam ser menos precisos em ambientes de alta vibração (Klocke, 2011). A termografia infravermelha permite medir temperaturas sem contato direto, utilizando câmeras que capturam radiação térmica, mas sua precisão pode ser afetada por refletância e emissividade da superfície, segundo Diniz *et al.* (1999). As sondas de temperatura, inseridas diretamente nas ferramentas ou nas peças, oferecem medições precisas, embora possam requerer modificações na configuração da máquina (Klocke, 2006).

### 2.3.3 Formas de medição de temperatura

O estudo realizado por Leonidas *et al.* (2022) compila diversas metodologias para a medição de temperatura durante o processo de usinagem, destacando suas características, vantagens e limitações. Os autores enfatizam o uso de termopares, que, embora sejam populares devido à sua simplicidade e custo acessível, podem apresentar desafios em ambientes de alta vibração e temperaturas extremas. Eles também abordam a termografia infravermelha, que permite a medição não invasiva da temperatura da superfície, destacando sua eficácia em capturar distribuições térmicas, embora sua precisão dependa da emissividade do material. Além disso, Leonidas *et al.* (2022) discutem o uso de sondas de temperatura, que podem ser integradas diretamente nas ferramentas, proporcionando medições mais precisas, mas exigindo modificações na configuração da máquina. A medição por contato é mencionada como uma alternativa que oferece resultados confiáveis, embora possa interferir no processo de corte. Por fim, os autores abordam a modelagem térmica, que combina dados experimentais e simulações para prever temperaturas, ressaltando sua utilidade no planejamento de operações de usinagem. Este estudo contribui significativamente para a compreensão das principais técnicas de medição de temperatura na usinagem, fornecendo uma base para a seleção de métodos adequados com base nas necessidades específicas de cada aplicação, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1 – Capacidades e limitações de métodos de medição de temperatura

<b>Métodos de medição</b>	<b>Capacidades</b>	<b>Limitações</b>
Ferramenta- peça	Baixo custo	Não aplicável com lubrificantes
	Simple implementação	Medição média da área de contato
Embutido	Baixo custo	Irreversível
	Simple implementação	Implementação complexa para fresamentos
	Ideal para distribuição de calor no material da peça	Atraso de medição para bruscas mudanças de temperaturas
Simples	Trabalhos experimentais em laboratório	Irreversível
	Medições rápidas	Incertezas de calibração
Câmera térmica	Mapa de distribuição de temperatura	Linha visão direta ininterrupta
	Não destrutivo	Não aplicável para lubrificantes

continua  
conclusão

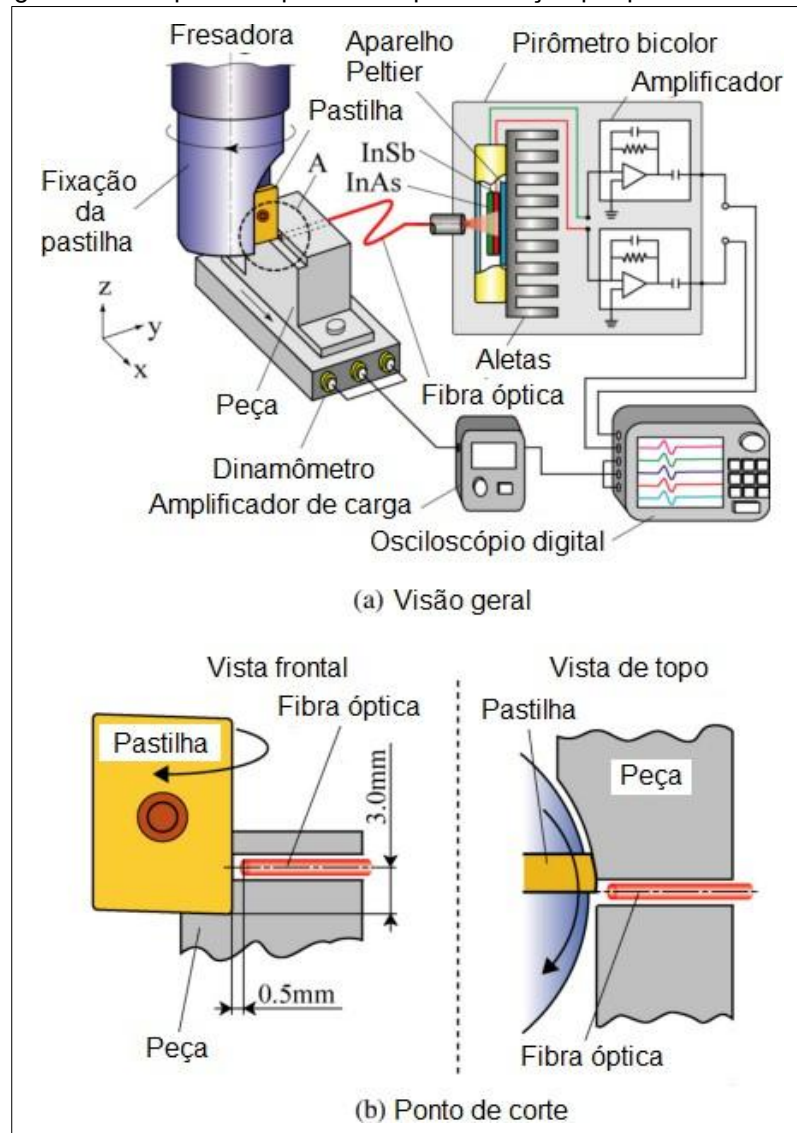
Métodos de medição	Capacidades	Limitações
Termômetro infravermelho	Tempo de resposta rápido	Incertezas de calibração
	Não destrutivo	Sensibilidade à temperatura ambiente
	Alta precisão	
Termômetro infravermelho de fibra óptica	Medições rápidas	Irreversível quando embutido
	Alta precisão e versatilidade	Implementação complexa para fresamentos

Fonte: Adaptado de Leonidas *et al.* (2022).

### 2.3.4 Medição por pirômetro de duas cores com fibra ótica

O estudo realizado por Okada *et al.* (2014) investigou a aplicação do pirômetro de duas cores com fibra ótica como uma solução eficaz para a medição de temperatura em processos de usinagem. Os autores destacaram que esse tipo de pirômetro, que utiliza a análise da radiação térmica emitida por um objeto em duas faixas espectrais, oferece vantagens significativas em relação aos métodos tradicionais de medição de temperatura, como a capacidade de operar em condições adversas, onde a presença de fluidos de corte e partículas pode interferir em medições diretas. O pirômetro de duas cores proporciona medições precisas e em tempo real, permitindo o monitoramento contínuo das temperaturas na interface entre a ferramenta e o material usinado. Os resultados obtidos no estudo mostraram que essa tecnologia não só melhora a precisão das medições térmicas, mas também contribui para a otimização do processo de usinagem, uma vez que permite ajustes em tempo real nos parâmetros de corte, minimizando o desgaste da ferramenta e melhorando a qualidade do acabamento da peça. Com isso, o trabalho de Okada *et al.* demonstra o potencial dos pirômetros de duas cores com fibra ótica para aprimorar a eficiência e a eficácia das operações de usinagem. Okada *et al.* (2014) criaram um diagrama que ilustra o sistema de medição de temperatura por meio do pirômetro de duas cores com fibra ótica, apresentado na Figura 15. Essa representação é crucial para compreender a configuração do sistema e os componentes envolvidos, mostrando como o pirômetro se integra ao processo de usinagem para realizar medições térmicas precisas mesmo em condições desafiadoras. O diagrama facilita uma análise mais aprofundada da eficácia da tecnologia proposta na otimização das operações de usinagem.

Figura 15 – Esquema experimental para medição por pirômetro bicolor



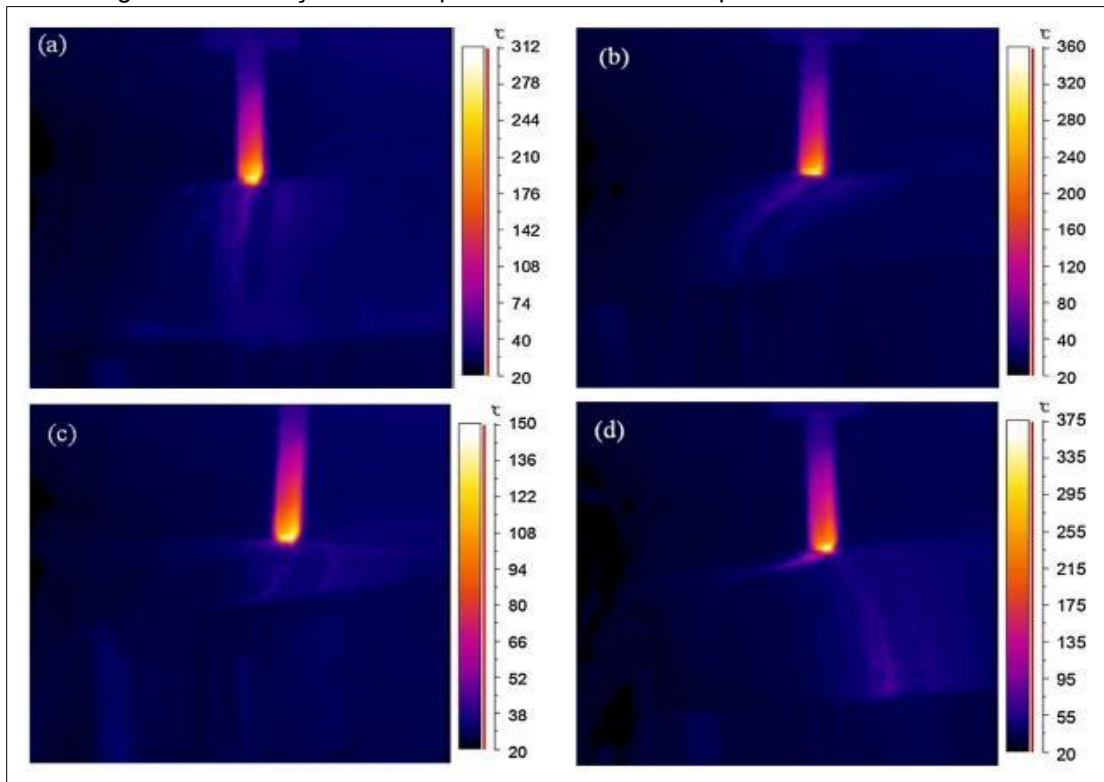
Fonte: Adaptado de Okada *et al.* (2014).

### 2.3.5 Medição por câmera infravermelha

Yan *et al.* (2014) exploraram a aplicação de câmeras infravermelhas para a medição de temperatura durante processos de usinagem, destacando as vantagens e os desafios associados a essa técnica. Os autores enfatizaram que a medição por câmera infravermelha permite a obtenção de imagens térmicas em tempo real, proporcionando uma visualização abrangente da distribuição de temperatura nas superfícies da ferramenta e da peça usinada. Essa abordagem não invasiva é particularmente útil para monitorar variações térmicas durante a usinagem, permitindo ajustes imediatos nos parâmetros de corte, o que pode melhorar a eficiência do processo e a qualidade do produto final. Além disso, Yan *et al.* (2014) abordaram a

importância da calibração da câmera e da consideração de fatores como a emissividade do material, que podem influenciar a precisão das medições. Os resultados do estudo demonstraram que a tecnologia de imagem térmica não apenas oferece uma maneira eficaz de monitorar a temperatura, mas também contribui para uma melhor compreensão dos fenômenos térmicos envolvidos na usinagem, permitindo otimizações que podem levar a uma maior produtividade e durabilidade das ferramentas. Assim, a pesquisa de Yan *et al.* ressalta o potencial das câmeras infravermelhas como uma ferramenta valiosa para o controle térmico em operações de usinagem. As imagens capturadas pela câmera durante o experimento estão representadas na Figura 16 abaixo.

Figura 16 – Medições de temperatura da ferramenta por câmera infravermelha



Fonte: Adaptado de Yan *et al.* (2014).

### 2.3.6 Medição por termopar inserido na ferramenta

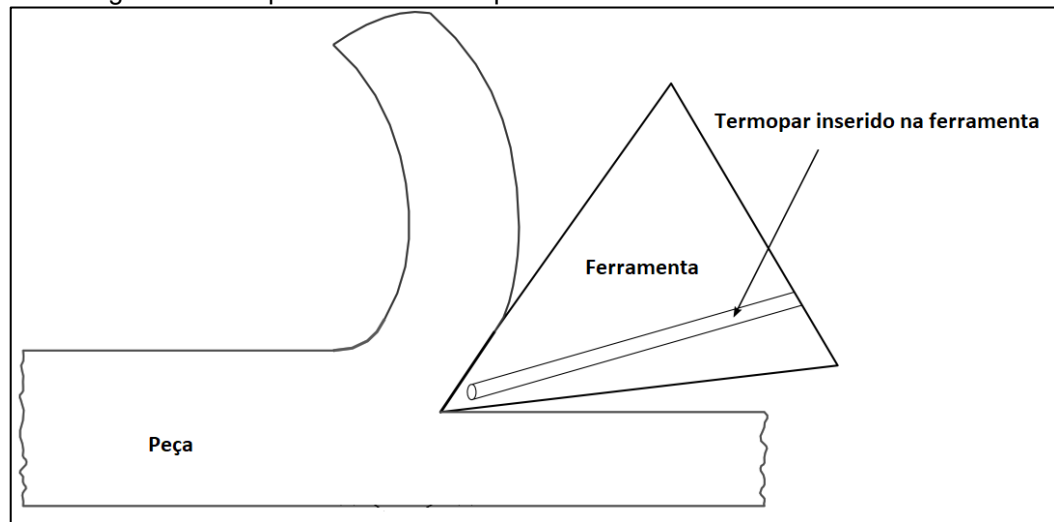
Lima (2017) investigou a medição de temperatura utilizando termopares inseridos diretamente na ferramenta de usinagem, visando obter dados mais precisos sobre as condições térmicas durante o corte. O autor destacou que essa abordagem permite medir a temperatura no local exato onde ocorre o contato entre a ferramenta

e o material, oferecendo informações críticas para a avaliação do desempenho da ferramenta e do processo de usinagem. Lima ressaltou que, ao inserir termopares na ferramenta, é possível monitorar as temperaturas em tempo real, permitindo ajustes dinâmicos nos parâmetros de corte e contribuindo para a otimização da eficiência e da durabilidade da ferramenta. No entanto, o estudo também abordou os desafios associados à instalação dos termopares, como a necessidade de garantir um bom contato térmico e evitar interferências na geometria da ferramenta. Os resultados obtidos mostraram que a utilização de termopares inseridos na ferramenta não só melhora a precisão das medições, mas também fornece dados valiosos para a análise do comportamento térmico durante a usinagem. Assim, a pesquisa de Lima (2017) destaca a importância de métodos de medição mais integrados para aprimorar o entendimento das condições térmicas na usinagem e suas implicações no desempenho do processo.

A medição pelo princípio do termopar baseia-se na propriedade dos metais de gerar uma tensão elétrica quando expostos a uma diferença de temperatura. Um termopar consiste em dois fios de diferentes metais que são unidos em um ponto, formando uma junção. Quando essa junção é exposta a uma temperatura diferente da extremidade onde os fios estão conectados, ocorre a geração de uma tensão elétrica, proporcional à diferença de temperatura entre as duas extremidades (Trent, 1988; Lima, 2017).

Esse fenômeno é conhecido como efeito Seebeck. A tensão gerada pode ser medida e, através de tabelas ou equações específicas para os pares de metais utilizados, pode ser convertida em uma leitura de temperatura. Os termopares são bastante utilizados na medição de temperatura em ambientes industriais devido à sua robustez, capacidade de operar em altas temperaturas e resposta rápida. Eles são especialmente eficazes para monitorar temperaturas em locais onde outros tipos de sensores não seriam práticos, como na interface entre a ferramenta e a peça durante processos de usinagem (Trent, 1988; Lima, 2017). Para realizar essa medição de maneira precisa, é necessário fazer um furo na ferramenta para inserir o termopar, como demonstrado na Figura 17.

Figura 17 – Esquemático de termopar embutido na ferramenta durante corte



Fonte: Adaptado de Leonidas (2022).

Em geral, os termopares têm um tempo de resposta relativamente rápido, o que significa que conseguem registrar mudanças de temperatura em um curto espaço de tempo. Essa rapidez se deve à sua construção, que permite uma boa transferência de calor entre o material da peça e a junção do termopar (Lima, 2017).

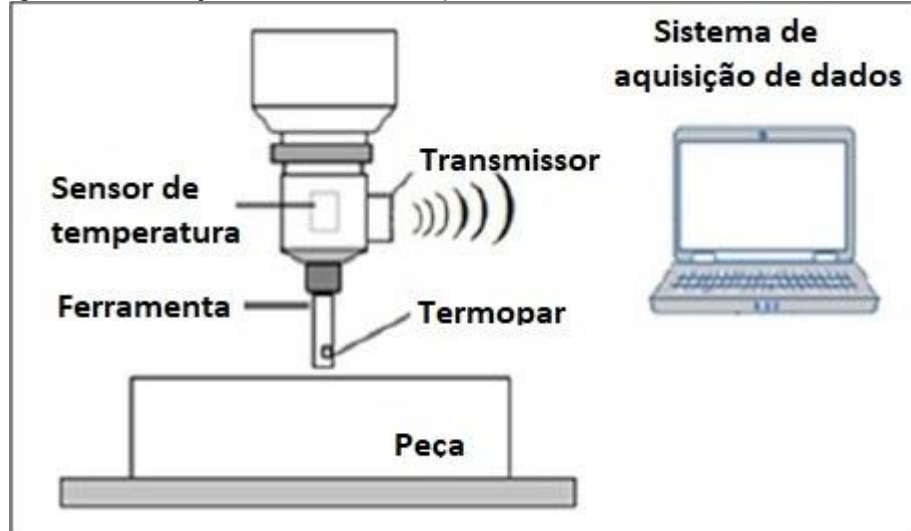
Entretanto, o tempo de resposta pode variar dependendo de vários fatores, como a massa e o diâmetro do termopar, o material da ferramenta, e a forma como o termopar está instalado. Termopares mais finos tendem a ter tempos de resposta mais curtos, enquanto aqueles com maior massa ou que estão mal posicionados podem demorar mais para refletir as mudanças de temperatura. Além disso, a resposta também pode ser influenciada pelas condições do ambiente, como a presença de fluidos de corte ou a movimentação da peça (Lima, 2017).

A inserção de termopares na peça ou na ferramenta de usinagem, aliada a um sistema de transmissão de dados sem fio, representa uma inovação significativa na monitorização térmica durante o processo de usinagem. Essa abordagem permite a coleta de dados em tempo real, facilitando o monitoramento contínuo das temperaturas em locais críticos, como na interface entre a ferramenta e o material usinado, conforme ilustrado na Figura 18 (Lima, 2017).

A transmissão de dados sem fio facilita a integração dos dados coletados com sistemas de controle e monitoramento mais amplos, permitindo análises em tempo real e ajustes automáticos nos parâmetros de corte para otimizar a eficiência e a qualidade do processo. Essa inovação também pode contribuir para a implementação de estratégias de manutenção preditiva, onde as condições térmicas podem ser

monitoradas para prever falhas ou desgastes antes que se tornem problemas sérios (Lima, 2017).

Figura 18 – Medição sem fio de termopar inserido na ferramenta em fresamento

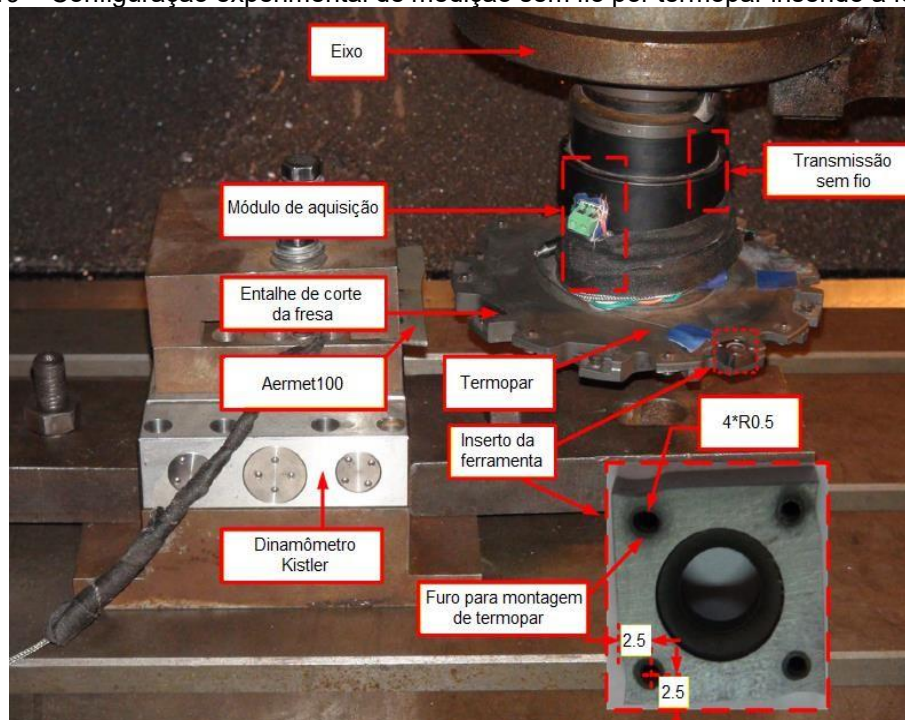


Fonte: Lima (2017).

Jiang (2018) investigou a medição da temperatura da ferramenta em processos de usinagem utilizando tecnologia sem fio, de acordo com a Figura 19, destacando as vantagens e os desafios dessa abordagem. O autor enfatizou que a capacidade de monitorar a temperatura em tempo real sem a necessidade de conexões físicas permite um posicionamento mais flexível dos sensores, como termopares, tanto na ferramenta quanto na peça usinada. Isso resulta em medições mais precisas e representativas das condições de corte, especialmente em ambientes industriais dinâmicos.

Jiang (2018) também abordou a integração da tecnologia sem fio com sistemas de controle automatizado, possibilitando ajustes instantâneos nos parâmetros de usinagem com base nas temperaturas monitoradas. Essa capacidade não apenas melhora a eficiência do processo, mas também ajuda a evitar danos à ferramenta e à peça, prolongando a vida útil dos componentes. Os resultados do estudo mostraram que a medição sem fio é uma solução promissora para otimizar operações de usinagem, permitindo um controle térmico mais eficaz e contribuindo para melhorias significativas na produtividade e na qualidade do produto final. Em suma, a pesquisa de Jiang (2018) reforça o potencial das tecnologias sem fio na evolução das práticas de usinagem moderna.

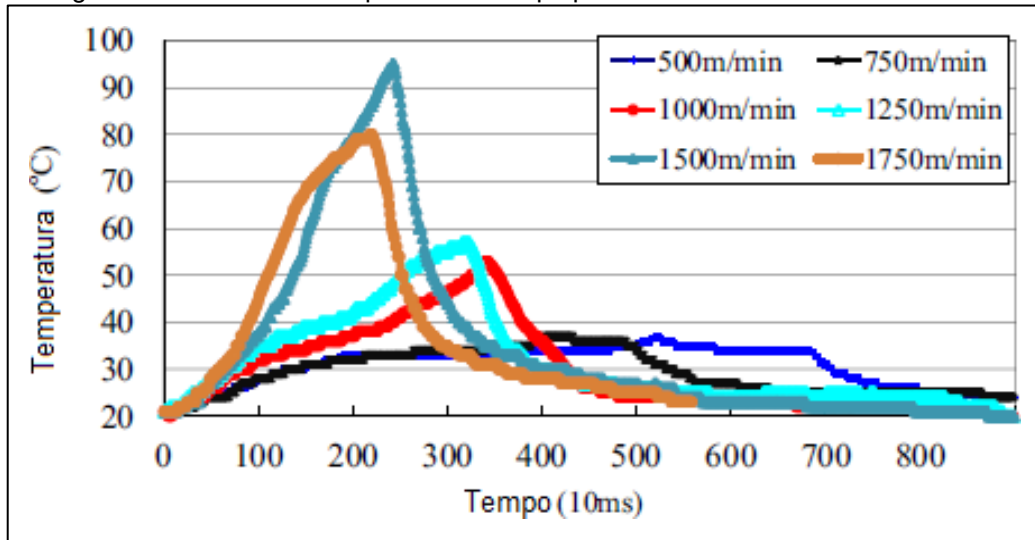
Figura 19 – Configuração experimental de medição sem fio por termopar inserido à ferramenta



Fonte: Adaptado de Jiang (2018).

Jiang (2018) utilizou um sistema de medição sem fio para registrar uma ampla gama de temperaturas em função de diferentes velocidades de corte, conforme mostrado na Figura 20. Ao analisar os dados coletados, o autor enfatizou que, em condições de alta temperatura, os efeitos da convecção de calor se tornam relevantes e não podem ser ignorados. Além disso, observou que as flutuações de temperatura da ferramenta durante o fresamento são afetadas pela interação entre o tempo de condução térmica, a convecção e a geração de calor. Essa análise destaca a necessidade de considerar todos esses aspectos ao otimizar os parâmetros de usinagem, permitindo um controle térmico mais eficaz e contribuindo para o melhor desempenho da ferramenta e a qualidade das peças produzidas.

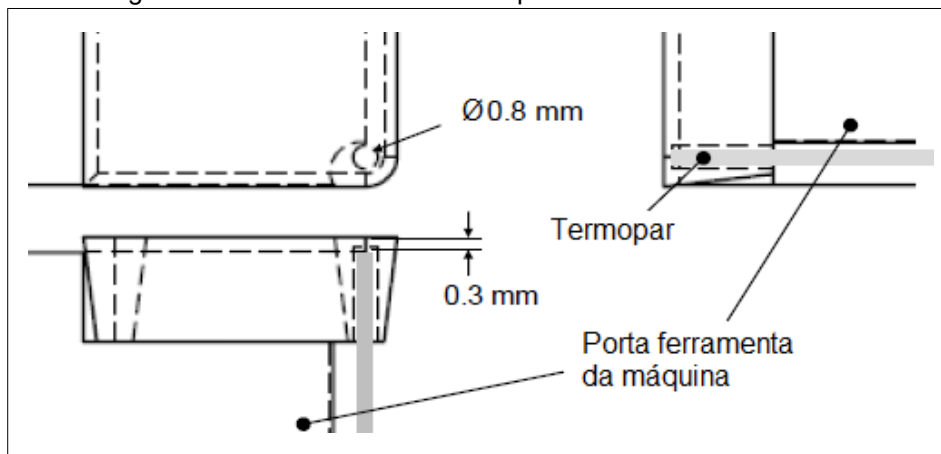
Figura 20 – Gráfico de temperatura x tempo para diferentes velocidades de corte



Fonte: Adaptado de Jiang (2018).

Karaguzel *et al.* (2016) exploraram o uso de termopares embutidos em insertos de metal duro não revestido durante o fresamento do aço ABNT 1050. No experimento, um termopar tipo K foi instalado em um furo com diâmetro de 0,8 mm, localizado a 0,3 mm do gume de corte, conforme demonstrado na Figura 21 abaixo. Essa metodologia permitiu uma medição precisa da temperatura ao longo do processo de usinagem, gerando informações importantes sobre as condições térmicas que afetam tanto a eficiência da ferramenta quanto a qualidade da peça usinada.

Figura 21 – Embutimento de termopar em inserto de metal duro



Fonte: Adaptado de Karaguzel *et al.* (2016).

A medição de temperatura no processo de usinagem é uma prática essencial que desempenha um papel crucial na otimização da eficiência e na qualidade dos produtos. As fontes consultadas, como os estudos de Jiang (2018) e Karaguzel *et al.*

(2016), destacam a relevância do monitoramento térmico para compreender as dinâmicas do processo, uma vez que as temperaturas elevadas podem impactar negativamente a durabilidade das ferramentas e a qualidade das peças usinadas. A variedade de métodos de medição, que inclui termopares, câmeras infravermelhas e pirômetros, oferece uma gama de abordagens para capturar dados térmicos de maneira precisa e em tempo real. No entanto, a complexidade envolvida na interação entre geração de calor, condução e convecção torna a medição uma tarefa desafiadora, exigindo técnicas avançadas e conhecimento aprofundado. Portanto, a integração de diferentes métodos de medição e a análise cuidadosa dos dados coletados são fundamentais para melhorar o controle térmico, permitindo um processo de usinagem mais eficiente e econômico.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão apresentados os ensaios realizados pelo Grupo de Usinagem (GUS) em colaboração com a empresa OTEC, com o objetivo de investigar processos de usinagem. O trabalho conjunto entre o GUS e a OTEC permitiu a realização de experimentos que avaliam o desempenho de diferentes materiais e técnicas de usinagem. Serão detalhados os materiais utilizados nas experiências, bem como os instrumentos e equipamentos empregados para garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos. A apresentação desses elementos é fundamental para compreender a metodologia aplicada e a relevância dos dados coletados durante os ensaios, que visam contribuir para o avanço das práticas de usinagem na indústria.

#### 3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA METODOLOGIA

Considerando os resultados obtidos por Zeilmann e Bordin (2014), juntamente com os conhecimentos de Tikal (2009), optou-se pelo polimento por arraste para este estudo. Esse método foi escolhido devido à sua eficácia comprovada, qualidade e por já ter sido utilizado previamente pelo grupo de usinagem (GUS) desta universidade.

A escolha dos métodos de medição de temperatura no contexto do processo de usinagem é crucial devido à sua influência direta na qualidade e na precisão dos resultados obtidos. Os diferentes métodos apresentados na tabela 1 oferecem vantagens específicas que podem ser aplicadas de acordo com as necessidades e características do ambiente de trabalho. Para este estudo foi utilizado o método dos termopares embutidos na peça e na ferramenta, devido à sua resposta rápida e à capacidade de medição em locais de difícil acesso e a possibilidade de coleta de dados em usinagens com altas velocidades de corte.

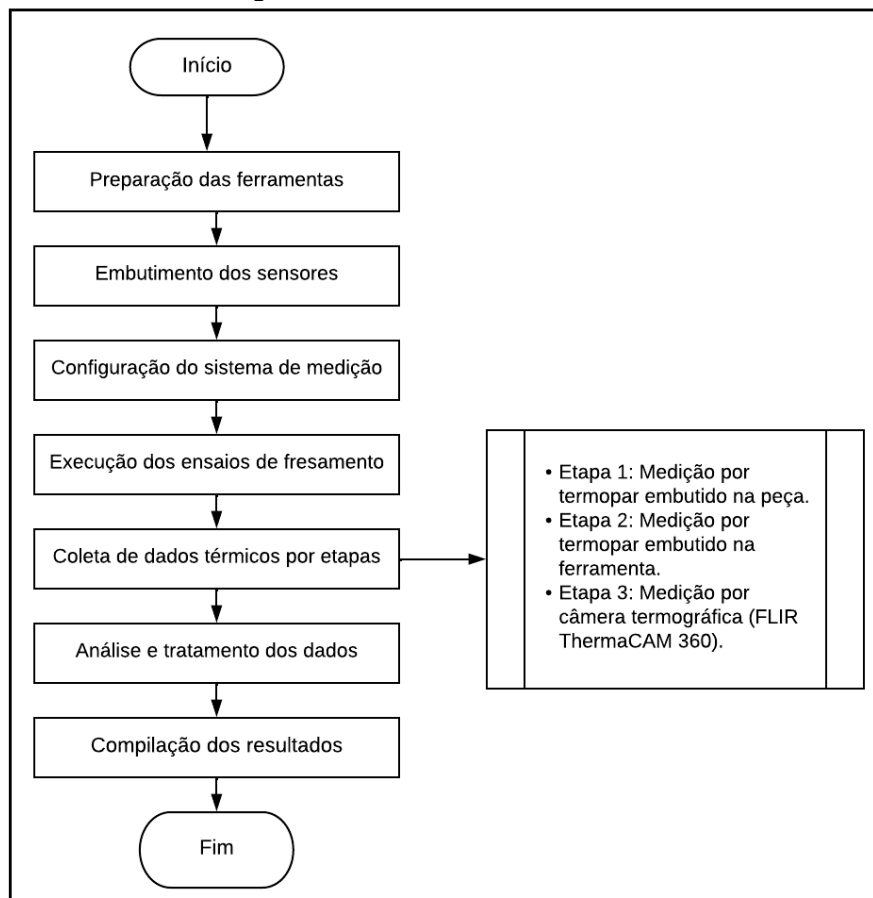
Outro fator relevante para esta decisão foi o seu baixo custo de implementação aliado a disponibilidade dos recursos no laboratório da UCS. Já técnicas mais avançadas, como câmeras termográficas, permitem a visualização em tempo real de padrões térmicos complexos, possibilitando uma análise detalhada e instantânea das condições térmicas durante o processo de usinagem, sendo aplicada nesse trabalho para a obtenção de dados comparativos em relação aos demais métodos.

### 3.2 FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES

O diagrama de atividades a seguir, apresentado na Figura 22, representa o sequenciamento de passos para a condução dos ensaios experimentais neste estudo. Primeiramente, foi realizada a etapa de preparação das ferramentas no laboratório da instituição (UCS). Em seguida, foi realizado o embutimento dos sensores e a configuração completa do sistema de medição.

Na sequência, foram realizados os ensaios de fresamento no corpo de prova, empregando tanto as fresas polidas quanto as não polidas. Posteriormente, os dados térmicos foram coletados em cada etapa pelos sistemas de medição implementados. Por fim, os dados foram sujeitos a análise, tratamento e compilação dos resultados de comparando com estudos semelhantes.

Figura 22 – Atividades desenvolvidas



Fonte: O autor (2024).

### 3.3 CONDIÇÕES DE USINAGEM

#### 3.3.1 Parâmetros de corte

Nesta seção, serão apresentados os parâmetros de corte empregados nos testes de usinagem, conforme especificado na Tabela 2. Esses parâmetros são cruciais, pois influenciam diretamente o desempenho da ferramenta, a qualidade da peça usinada e a eficiência do processo como um todo. A fixação dos parâmetros de corte, detalhados na tabela, visa garantir a repetibilidade dos experimentos e facilitar a compreensão das interações térmicas durante o processo de usinagem. Os parâmetros de corte e a geometria das ferramentas adotados neste trabalho foram definidos com base em um pré-teste realizado pelo GUS (Grupo de Usinagem) da UCS no projeto OTEC, sendo os mesmos utilizados nos projetos OTEC 1 e OTEC 2, o que assegura a repetibilidade dos resultados e a continuidade metodológica.

Tabela 2 – Parâmetros de corte

Parâmetros	Valor	Unidade
Velocidade de corte ( $V_c$ )	180,00	$m / min$
Avanço por gume ( $f_z$ )	0,05	$mm / rot$
Profundidade de corte axial ( $a_p$ )	1,00	$mm$
Profundidade de corte lateral ( $a_e$ )	0,40	$mm$
Rotação ( $n$ )	2865	$rpm$

Fonte: O autor (2024).

#### 3.3.2 Ferramenta

Neste trabalho foram empregadas fresas de topo da marca Secta Tools, com diâmetro de 20 mm. As ferramentas são fabricadas em metal duro com ligante de cobalto (90% WC e 10% Co), classe K40UF, caracterizada por grão submicrométrico, dureza aproximada de 1610 HV30 e densidade de 14,45 g/cm<sup>3</sup>, sem revestimento. Cada fresa possui quatro gumes e apresenta relação comprimento/diâmetro igual a três ( $l/d = 3$ ). Essas fresas, tanto revestidas quanto não revestidas, foram selecionadas para garantir a durabilidade e a eficiência durante os ensaios. Além disso, os ângulos das fresas foram cuidadosamente definidos e estão detalhados na Tabela 3, assegurando que as condições de usinagem se mantivessem dentro dos parâmetros

esperados, permitindo uma avaliação adequada dos resultados. Essa mudança não só garantiu a continuidade dos experimentos, mas também proporcionou novas perspectivas sobre o desempenho das ferramentas sob as condições de corte estabelecidas.

Tabela 3 – Ângulos da fresa de topo

Ângulos	Valor	Unidade
Ângulo de Folga ( $\alpha$ )	10°	graus
Ângulo de Cunha ( $\beta$ )	72°	
Ângulo de Saída ( $\gamma$ )	8°	
Ângulo de Hélice ( $\lambda$ )	30°	

Fonte: Secta Tools (2021).

### 3.3.3 Polimento da ferramenta

O polimento por arraste foi empregado para melhorar a qualidade superficial das fresas utilizadas no experimento, garantindo um acabamento uniforme e a remoção de imperfeições. Esse método consiste em movimentar uma mídia abrasiva sobre a ferramenta, sendo particularmente eficaz em superfícies complexas, onde outras técnicas apresentam limitações. A aplicação foi realizada pela empresa OTEC, reconhecida por sua expertise em tratamentos de superfície, utilizando equipamentos que asseguram precisão e controle do processo. Além de reduzir o atrito durante a usinagem, esse tratamento aumenta a durabilidade das ferramentas e a eficiência do corte. Na preparação do gume de corte, foram utilizadas duas mídias abrasivas fornecidas pela OTEC Präzisionsfinish GmbH e aplicadas na máquina OTEC SF-3. A primeira, HSC 1/300, é composta por 30% de carbetto de silício com grãos de aproximadamente 200  $\mu\text{m}$  e 70% de grânulos de casca de noz entre 800 e 1300  $\mu\text{m}$ , sendo aplicada por 30 segundos no sentido horário a 40 rpm. A segunda, H4/400, combina grânulos de casca de noz menores (400–800  $\mu\text{m}$ ) com pasta diamantada, operando por 120 segundos, também no sentido horário e a 40 rpm. A Figura 23 ilustra esse processo.

Figura 23 – Polimento da ferramenta por arraste

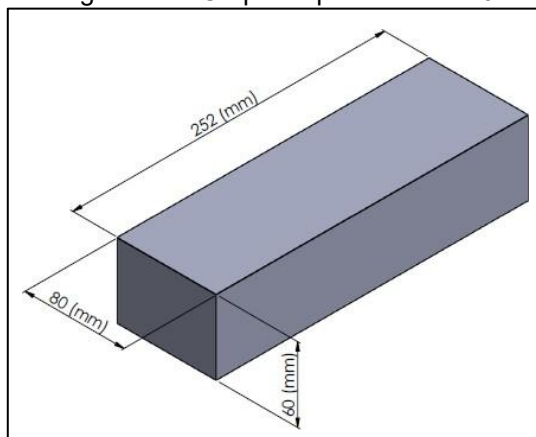


Fonte: O autor (2024).

### 3.3.4 Corpo de prova

O corpo de prova utilizado nos experimentos de fresamento foi o aço AISI P20, também conhecido como 42CrMo7, que possui uma dureza média de 36 HRC. As dimensões do corpo de prova são de 252 mm x 80 mm x 60 mm, conforme ilustrado na Figura 24. Tais dimensões se justificam pela adequação à capacidade da máquina e pelo espaço suficiente para que os sensores sejam aplicados corretamente. Essas características são fundamentais para a realização dos testes, pois garantem um material adequado para a análise do desempenho das ferramentas de corte sob as condições de usinagem estabelecidas.

Figura 24 – Corpo de prova AISI P20



Fonte: PPGMEC (2024).

Os aços do tipo AISI P20 são amplamente utilizados na fabricação de moldes para injeção de plásticos com baixa ou média abrasividade, moldes para conformação por sopro, vulcanização de borracha e, em determinadas situações, em processos de fundição de ligas não ferrosas. As chapas laminadas são preferencialmente empregadas na maioria dos projetos, devido ao seu excelente custo-benefício, especialmente quando não é exigido um elevado grau de polimento. Já os blocos forjados são recomendados para aplicações que requerem elevado nível de polimento ou para peças com espessura superior a 200 mm. A Tabela 4 especifica a composição química deste material.

Tabela 4 – Composição química aço AISI P20

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>
AISI P20	0,36	0,50	0,80	1,70	0,40	--

Fonte: Hoseiny (2025).

### 3.4 INSTRUMENTAÇÃO

Os testes de fresamento foram conduzidos no laboratório da Universidade de Caxias do Sul (UCS), onde foram utilizados diversos instrumentos e equipamentos para garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos. Entre os principais instrumentos empregados, destacam-se as fresadoras de controle numérico, que permitiram a realização de cortes com alta precisão e repetibilidade.

Além disso, foram utilizados dispositivos de medição de temperatura, como termopares e câmeras infravermelhas, para monitorar as temperaturas durante o processo de usinagem. Essa infraestrutura do laboratório da UCS possibilitou a realização de uma análise detalhada dos parâmetros de corte e das condições de usinagem, contribuindo significativamente para a validade dos experimentos realizados. Na sequência serão apresentadas informações sobre estes dispositivos.

#### 3.4.1 Centro de usinagem

Os testes de fresamento foram realizados utilizando um centro de usinagem LG-500, fabricado pela Hartford e equipado com controle Mitsubishi. Este equipamento apresenta uma rotação máxima de 10.000 rotações por minuto (RPM) e uma potência de 10 kW, conforme mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Centro de usinagem Hartford LG-500



Fonte: O autor (2024).

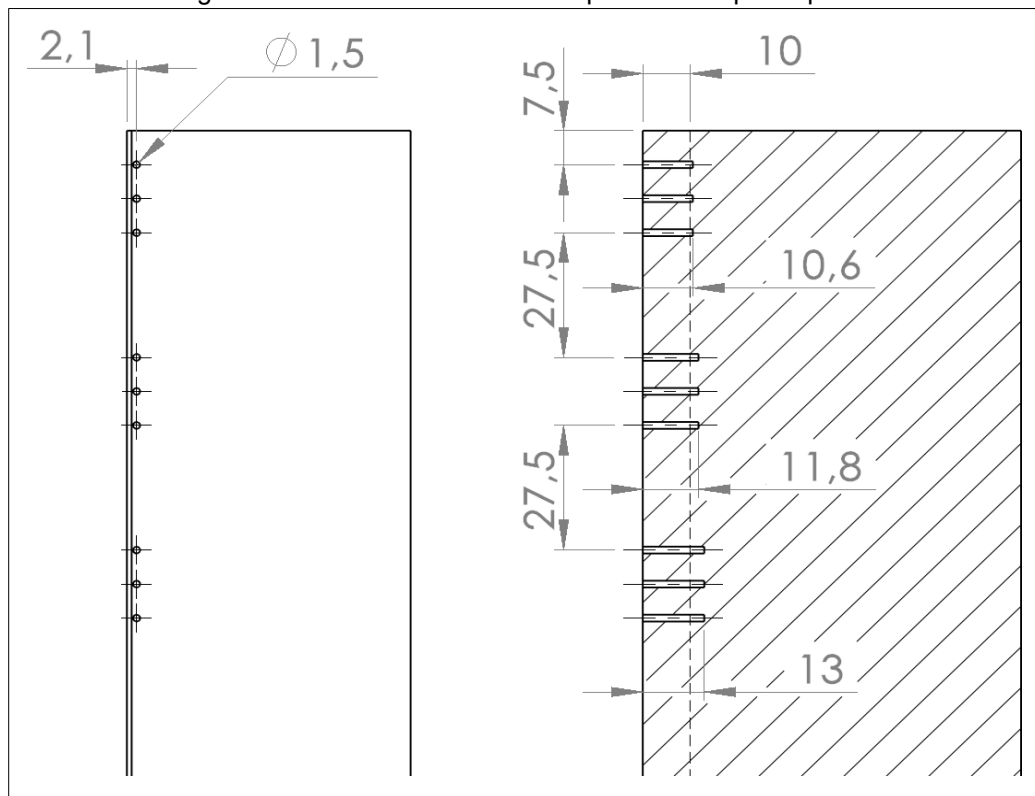
### 3.4.2 Embutimento de termopares no corpo de prova

Os corpos de prova foram preparados com um total de 27 furos, cada um com um diâmetro de 1,5 mm, distribuídos em dois corpos de prova. Essas perfurações foram organizadas em intervalos de 3 unidades, com um espaçamento de 7,5 mm entre cada furo e 27,5 mm entre os conjuntos de perfurações. Além disso, foi realizado um desbaste de 10 mm na face inicial dos corpos de prova, e a fixação dos termopares foi cuidadosamente embutida nesses furos.

Devido ao valor reduzido da profundidade de corte radial "ae" e à quantidade limitada de passagens, será feito um desbaste de 10 mm na face inicial do corpo de prova. Isso é necessário para permitir a fixação dos termopares embutidos no corpo de prova.

Vale ressaltar que todos os furos foram posicionados a 2,1 mm da face superior da peça, resultando em um espaço de 0,3 mm entre a parede interna do furo do termopar e a superfície do corpo de prova após a usinagem. Essa configuração é demonstrada na Figura 26, que proporciona uma compreensão mais clara do arranjo.

Figura 26 – Embutimento de termopares ao corpo de prova



Fonte: O autor (2024).

### 3.4.3 Medição de temperatura por termopar inserido na peça

O módulo de aquisição QuantumX MX1609KB demonstrado na Figura 27 é um dispositivo de alta precisão, projetado para medições dinâmicas de temperatura em aplicações de pesquisa e desenvolvimento. Ele oferece 16 canais de termopares tipo K, com capacidade de medir temperaturas entre  $-100^{\circ}\text{C}$  e  $1300^{\circ}\text{C}$ , proporcionando uma taxa de amostragem de até 600 Hz por canal. Esse equipamento destaca-se pela alta precisão, com uma margem de erro de apenas  $\pm 0,5\text{ K}$ , sendo ideal para capturar rapidamente variações de temperatura em processos como usinagem. Além disso, os canais são eletricamente isolados, o que garante medições livres de interferências e maior robustez para ambientes industriais desafiadores. O QuantumX MX1609KB se integra facilmente a sistemas existentes via interfaces Ethernet ou Firewire, facilitando sua conectividade e operação eficiente em ambientes complexos.

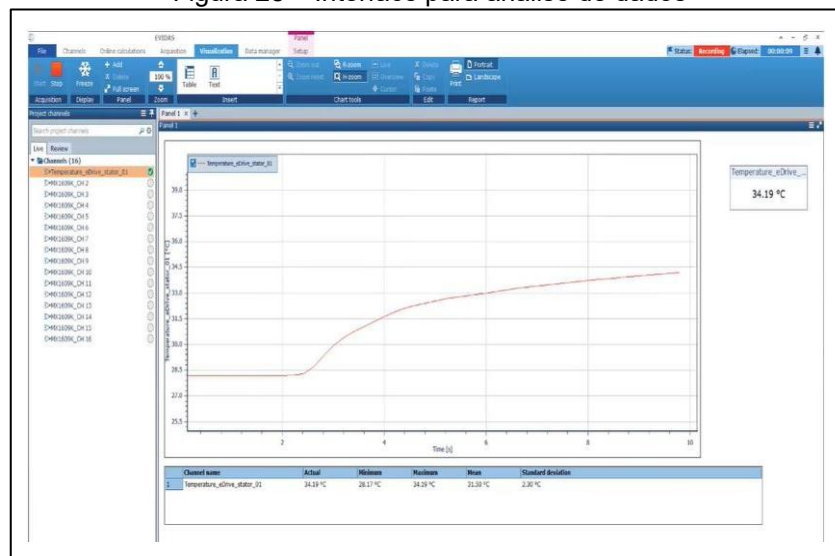
Figura 27 – Módulo de aquisição de termopares QuantumX MAX1609KB



Fonte: HBM (2024).

Suas funcionalidades incluem a sincronização de múltiplos módulos para medições simultâneas de diversas variáveis, suporte a diferentes tipos de termopares (como K, J, N e T), além de um diagnóstico inteligente que alerta para erros de conexão dos sensores. O QuantumX MX1609KB oferece uma interface avançada para visualização de dados em tempo real, que pode ser acessada via software dedicado, como o Catman da HBM, permitindo o monitoramento contínuo das medições. Essa interface facilita a configuração de parâmetros de medição, a captura de dados de forma sincronizada e o acompanhamento imediato das leituras de temperatura. Além disso, permite a geração de relatórios e gráficos em tempo real, oferecendo uma visão clara do comportamento térmico durante processos críticos, como em ensaios de usinagem, tudo de forma visual e intuitiva através de conexões Ethernet ou USB., conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28 – Interface para análise de dados



Fonte: HBM (2024).

#### **3.4.4 Embutimento de termopar às ferramentas**

Para a realização dos experimentos, as fresas foram perfuradas com a criação de dois furos, cada um com 2 mm de diâmetro. Esses furos foram posicionados a uma distância de 10,3 mm um do outro, deixando uma folga aproximada de 0,3 mm até as extremidades do gume da ferramenta. Essa configuração foi adotada para garantir a precisão na fixação dos termopares e assegurar que a estrutura das fresas não fosse comprometida durante o processo de usinagem, permitindo a coleta de dados térmicos sem interferir na eficiência do corte.

Para realizar esta furação foi utilizado o equipamento de eletroerosão ENGEMAQ EDM 440 NC. Esta é uma máquina CNC de alta precisão utilizada no processo de usinagem por eletroerosão, que envolve a remoção de material através de descargas elétricas controladas. Este modelo possui comando numérico computadorizado (CNC), facilitando a automação e precisão em processos complexos. A EDM 440 NC é especialmente eficaz na usinagem de materiais duros ou em geometrias detalhadas, como moldes, matrizes e ferramentas de corte, onde métodos convencionais seriam ineficientes ou inviáveis. A máquina permite a execução de peças com alta precisão dimensional, além de oferecer controle sobre os parâmetros de erosão, como a intensidade da descarga elétrica e a velocidade de avanço do eletrodo. O sistema NC também proporciona facilidade na repetição de processos e na execução de geometrias complexas, sendo amplamente utilizado em indústrias de moldes, ferramentarias e na produção de componentes que exigem tolerâncias rigorosas. Além disso, o ENGEMAQ EDM 440 NC mostrado na Figura 29 é equipado com sistemas de refrigeração e filtragem, garantindo a remoção eficaz de partículas e prolongando a vida útil dos eletrodos, ao mesmo tempo em que aumenta a qualidade do acabamento da peça final.

Figura 29 – Equipamento EDM 440 NC



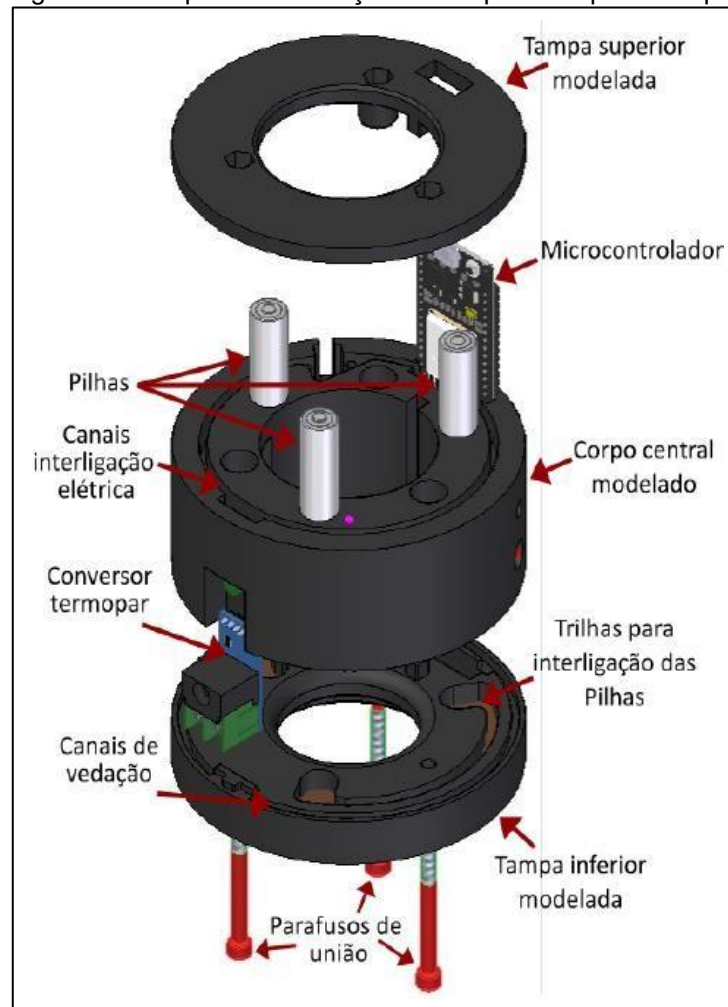
Fonte: O autor (2024).

### 3.4.5 Medição de temperatura por termopar inserido na ferramenta

A técnica de embutimento de termopares para medição de temperatura é amplamente utilizada em pesquisas devido à sua simplicidade e custo acessível, como destacado por Leonidas *et al.* (2022). No entanto, sua aplicação em fresas de topo apresenta desafios significativos, principalmente pela necessidade de embutir o termopar em uma ferramenta que pode atingir rotações de até 10.000 RPM, o que demanda um sistema robusto de coleta de dados.

O sistema utilizado neste trabalho foi desenvolvido por Schmitt e Adamatti (2022) durante um programa de estágio, conforme mostrado na Figura 30. O objetivo do experimento foi captar a temperatura da ferramenta em movimento, utilizando um termopar tipo K com uma taxa de aquisição mínima de quatro amostras por segundo, durante ensaios de aproximadamente quinze segundos.

Figura 22– Proposta de medição de temperatura por termopar



Fonte: Schmitt e Adamatti (2022).

O software desenvolvido possui dois modos de operação: configuração e aquisição, definidos pela forma como o dispositivo está sendo alimentado. Quando o dispositivo é alimentado pelo cabo USB, ele entra em modo de configuração. Neste modo, um ponto Wi-Fi com o nome "AP TempMeter" é aberto e uma página web é disponibilizada no IP 192.168.4.1, permitindo realizar várias parametrizações do experimento e o download dos dados coletados no modo de aquisição. A Figura 31 ilustra a organização desta página.

Figura 231 – Página de configuração



Fonte: Schmitt e Adamatti (2022).

### 3.4.6 Medição de temperatura por câmera termográfica

O uso da câmera térmica na medição de temperatura de ferramentas de fresamento proporciona uma análise detalhada e precisa das condições operacionais dessas ferramentas. A capacidade de capturar imagens térmicas e visuais simultaneamente permite monitorar em tempo real a distribuição de calor, identificando pontos de superaquecimento que podem indicar desgaste excessivo ou falhas iminentes. Com a tecnologia de alta sensibilidade térmica e funcionalidades como a detecção automática de áreas quentes e frias, os profissionais podem realizar ajustes imediatos no processo de fresamento para otimizar a performance e prolongar a vida útil das ferramentas.

A câmera térmica Flir ThermaCAM 360 de 1.3 megapixels, ilustrada na Figura 32 e utilizada neste trabalho, se destaca pela sua capacidade de associar automaticamente imagens visuais e térmicas em formato JPEG, oferecendo uma análise precisa e eficiente. Esta funcionalidade é complementada pelo uso de softwares avançados como o QuickReport, para análise e emissão de relatórios, e o ThermaCAM Reporter (opcional), compatível com o Microsoft Word e com a função de verificação ortográfica (Spell Check).

Figura 242 – Câmera Termográfica Flir ThermoCAM 360



Fonte: Flir (2009).

Com alta sensibilidade térmica, a câmera produz imagens cristalinas e medições de temperatura precisas. Ela inclui tabelas de emissividade, cinco pontos de temperatura e a função Delta T, que permite comparações de temperatura com precisão. O foco pode ser ajustado automaticamente ou manualmente, e o zoom digital contínuo de 8x oferece detalhes minuciosos das áreas analisadas.

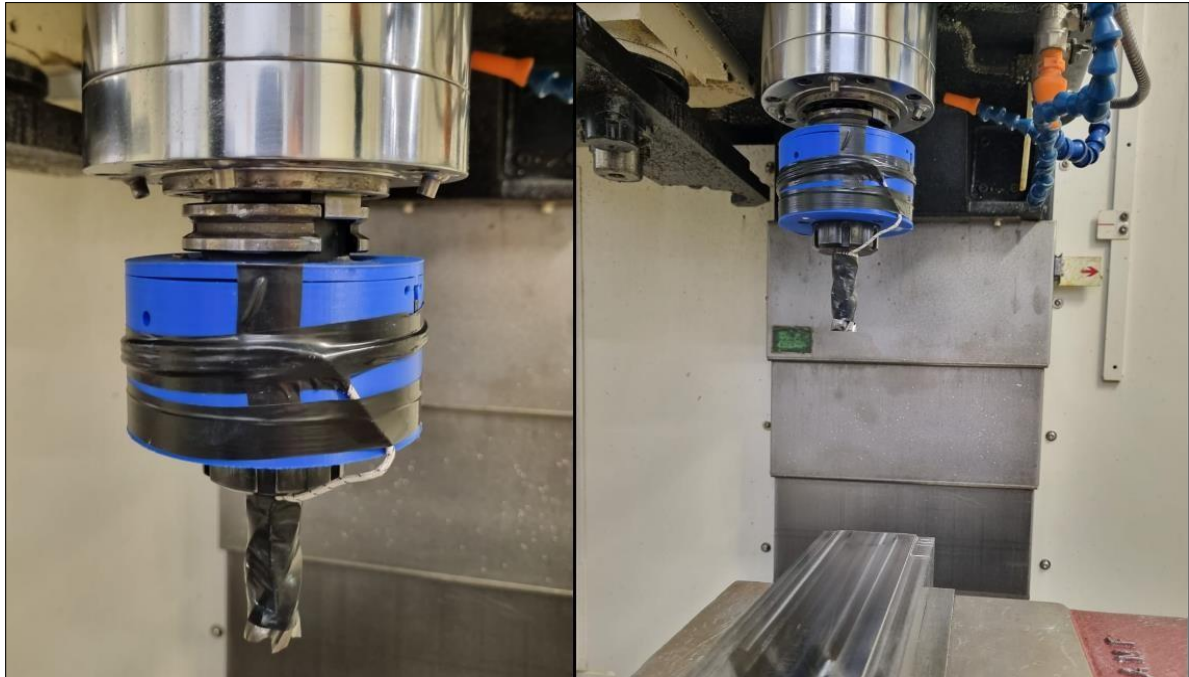
Outras características incluem a gravação de voz, anotação de texto e desenhos (sketches) diretamente na imagem, e a funcionalidade Thermal Fusion, que permite a fusão inteligente das imagens térmicas e visuais. O amplo display LCD colorido de 3.5" proporciona uma visualização clara e detalhada das imagens capturadas. Além disso, a câmera conta com o LaserLocatIR™ embutido, que facilita a localização de pontos específicos, e lentes intercambiáveis para maior versatilidade em diversas aplicações. Para as medições realizadas foi ajustada uma emissividade de 0,05 com a câmera posicionada a 0,5 m de distância do processo de fresamento.

### 3.5 PREPARAÇÃO PARA USINAGEM

Após finalizar os procedimentos de embutimento e já tendo recebido as fresas com o devido tratamento realizado pela OTEC, o próximo passo consiste na instalação do conjunto de medição do termopar embutido, que foi montado previamente no porta-piça do centro de usinagem. Em seguida, a primeira ferramenta a ser testada foi

fixada no equipamento. O corpo de prova, junto com seu sistema de medição de termopares previamente configurado, foi colocado na estação de trabalho. As duas configurações de montagem estão ilustradas na Figura 33, apresentada a seguir. Vale destacar que todos os sistemas de medição foram verificados antes da execução dos ensaios discutidos neste estudo.

Figura 33 – Estação de usinagem preparada para ensaios



Fonte: O autor (2024).

### 3.6 DADOS DE ENTRADA E SAÍDA

Nesta seção estão sendo apresentados os dados de entrada e saída dos testes realizados, bem como os pontos e os métodos de medição utilizados no decorrer dos experimentos. Conforme ilustra a Tabela 5, mediante variação do tipo de tratamento de gume da ferramenta será observada a influência na temperatura de usinagem, tanto na peça quanto na ferramenta de corte, utilizando os referidos métodos de medição para a coleta dos dados.

Tabela 5 – Dados de entrada e saída, pontos e métodos de medição adotados

Dados de Entrada (Tratamentos)	Dados de Saída	Pontos de medição	Métodos de medição
Sem tratamento			Termopar embutido na peça
H 4/400	Temperatura	Peça e ferramenta	Termopar embutido na ferramenta

### 3.7 ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS

A análise dos dados térmicos coletados durante os experimentos de usinagem com ferramentas tratadas e não tratadas será realizada utilizando técnicas estatísticas descritivas e inferenciais. A seguir, descreve-se as etapas que serão implementadas para tratar e interpretar os dados, além das ferramentas analíticas que fundamentam essas escolhas, com a devida justificação bibliográfica.

#### 3.7.1 Estatísticas descritivas

A utilização de estatísticas descritivas visa fornecer uma visão geral dos dados, identificando as características principais de cada variável, como médias, medianas, desvios padrão e intervalos de temperatura.

As análises descritivas serão inicialmente utilizadas para obter uma visão geral dos dados, calculando as medidas de tendência central e dispersão, como média, mediana, desvio padrão, mínimo e máximo. A utilização de estatísticas descritivas é fundamental para entender a distribuição dos dados antes de realizar qualquer teste inferencial (Montgomery, 2017).

#### 3.7.2 Teste de normalidade

Aplicar o teste de normalidade tem o objetivo de avaliar se as distribuições de temperatura seguem uma distribuição normal, o que é crucial para a escolha de testes estatísticos apropriados.

O teste de normalidade será realizado utilizando o teste de Shapiro-Wilk, um método amplamente utilizado para verificar se uma amostra segue a distribuição normal (Razali; Wah, 2011). Caso os dados não sigam a normalidade, serão aplicados testes não paramétricos, como o teste de Kruskal-Wallis, como discutido por Conover (1999). Serão gerados histogramas e boxplots para a visualização das distribuições dos dados de cada canal, de forma a complementar os resultados do teste de

normalidade, sendo uma ação necessária para determinar quais testes estatísticos serão aplicados nas comparações subsequentes.

### **3.7.3 Comparação das temperaturas entre tratamentos**

O objetivo desta análise é verificar se há diferenças estatisticamente significativas nas temperaturas obtidas durante o processo de usinagem entre ferramentas com e sem tratamento de gume. Para isso, foi realizada uma comparação entre os dois grupos utilizando testes estatísticos apropriados, como o teste t de Student — aplicado quando os dados apresentam distribuição normal — ou o teste de Kruskal-Wallis, indicado para dados que não seguem uma distribuição paramétrica (Conover, 1999). Esses testes permitem avaliar se as médias de temperatura diferem de forma significativa entre os tratamentos. Como apoio visual à análise, foram utilizados boxplots para ilustrar a variação e a distribuição dos dados em cada grupo, bem como gráficos de barras para representar as médias de temperatura por tipo de tratamento. Essa etapa é fundamental para o relatório final, pois possibilita concluir se o tratamento aplicado ao gume da ferramenta tem impacto direto na temperatura gerada durante a usinagem.

### **3.7.4 Evolução temporal das temperaturas**

O objetivo desta etapa é identificar tendências e variações de temperatura ao longo do tempo, possibilitando uma análise detalhada da dinâmica térmica durante o processo. Para isso, foram utilizados gráficos de linha, que permitem visualizar a evolução temporal das temperaturas registradas, facilitando a detecção de padrões e possíveis anomalias (Montgomery, 2017). Foram elaborados quatro gráficos de linha, correspondentes aos diferentes canais de medição, permitindo uma avaliação individualizada de cada ponto de coleta. Essa análise é essencial para o relatório final, pois fornece uma visão clara e contínua do comportamento térmico ao longo do tempo, contribuindo para a compreensão do desempenho térmico do processo.

### 3.7.5 Teste ANOVA/Kruskal-Wallis

Nesta etapa da análise, busca-se avaliar se há diferenças estatisticamente significativas nas temperaturas obtidas entre ferramentas submetidas a distintos tratamentos de gume. Para isso, serão aplicados testes estatísticos como a ANOVA, quando os dados apresentarem distribuição normal, ou o teste de Kruskal-Wallis, em casos de dados não paramétricos (Field, 2013). Embora essa comparação seja essencial para validar os resultados entre os grupos, ela não será incluída no relatório final. O tratamento dos dados térmicos foi conduzido com rigor metodológico, utilizando abordagens descritivas e inferenciais. Serão empregados testes de normalidade, análise de variância, análise de correlação e avaliação temporal, assegurando a consistência dos resultados e uma compreensão precisa dos efeitos térmicos associados aos diferentes tratamentos aplicados às ferramentas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na presente seção de Resultados e Discussões, foi explorada a influência do tratamento de gume sobre a temperatura durante o processo de fresamento, uma variável crítica que afeta tanto a qualidade do acabamento superficial quanto a durabilidade das ferramentas de corte. A compreensão da temperatura gerada durante o fresamento é essencial, uma vez que temperaturas elevadas podem resultar em desgaste acelerado da ferramenta e, conseqüentemente, comprometer a eficácia do processo de usinagem.

Inicialmente foi apresentada a análise da Medição de Temperatura por Termopar Inserido na Peça, onde abordou-se a metodologia empregada para monitorar as variações térmicas diretamente na peça usinada, destacando como as características do gume influenciam essas medições. Em seguida, discutiu-se a Medição de Temperatura por Termopar Inserido na Ferramenta, que permite entender a relação entre o aquecimento da ferramenta e o desempenho do fresamento, considerando a eficiência do tratamento de gume aplicado. Por fim, apresentou-se a Medição de Temperatura por Câmera Termográfica, uma técnica que proporciona uma visualização abrangente das distribuições térmicas, permitindo uma análise mais detalhada e precisa das condições térmicas durante o fresamento.

Para embasar os resultados obtidos, diversas ferramentas de análise estatística foram aplicadas, incluindo análise de variância (ANOVA), testes de significância e modelagem estatística. Essas ferramentas possibilitaram a identificação de tendências e correlações significativas entre as variáveis estudadas, permitindo uma interpretação mais robusta dos dados. A utilização dessas análises estatísticas não apenas reforça a credibilidade dos resultados, mas também proporciona um entendimento mais profundo sobre a dinâmica térmica, contribuindo para a formulação de conclusões fundamentadas.

Através dessas abordagens, foram apresentados não apenas os dados obtidos, mas também discussões sobre suas implicações práticas e teóricas, alinhando-os com as expectativas e objetivos estabelecidos nas etapas anteriores da pesquisa. Assim, esta seção desempenha um papel fundamental na elucidação dos resultados e na construção de um entendimento mais profundo sobre a dinâmica térmica envolvida no fresamento com diferentes tratamentos de gume.

#### 4.1 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR TERMOPAR INSERIDO NA PEÇA

O teste de Shapiro-Wilk foi utilizado para verificar se as distribuições de temperatura obtidas nos experimentos e medições por termopar inserido na peça seguem uma distribuição normal. Esse teste é fundamental para determinar quais análises estatísticas são mais apropriadas para a avaliação da influência do tratamento de gume na temperatura da peça durante a usinagem. Caso os dados apresentem normalidade, pode-se utilizar testes paramétricos como a ANOVA para comparar os diferentes grupos. Se os dados não forem normalmente distribuídos, testes não paramétricos, como o de Kruskal-Wallis, serão mais adequados. Os resultados da aplicação deste teste para cada conjunto de dados são detalhados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados do teste de Shapiro-Wilk para normalidade das distribuições de temperatura

Canal	Estadística do Teste	p-valor
1_300_TESTE1_MX1609_0_CH_1	0,675	0
1_300_TESTE1_MX1609_0_CH_2	0,774	0
1_300_TESTE1_MX1609_0_CH_3	0,958	0
1_300_TESTE1_MX1609_0_CH_4	0,974	0
1_300_TESTE2_MX1609_0_CH_1	0,942	0
1_300_TESTE2_MX1609_0_CH_2	0,560	0
1_300_TESTE2_MX1609_0_CH_3	0,825	0
1_300_TESTE2_MX1609_0_CH_4	0,947	0
1_300_TESTE3_MX1609_0_CH_1	0,702	0
1_300_TESTE3_MX1609_0_CH_2	0,470	0
1_300_TESTE3_MX1609_0_CH_3	0,880	0
1_300_TESTE3_MX1609_0_CH_4	0,989	0
4_400_TESTE1_MX1609_0_CH_1	0,968	0
4_400_TESTE1_MX1609_0_CH_2	0,930	0
4_400_TESTE1_MX1609_0_CH_3	0,909	0
4_400_TESTE1_MX1609_0_CH_4	0,987	0
4_400_TESTE2_MX1609_0_CH_1	0,942	0
4_400_TESTE2_MX1609_0_CH_2	0,390	0
4_400_TESTE2_MX1609_0_CH_3	0,939	0
4_400_TESTE2_MX1609_0_CH_4	0,962	0
4_400_TESTE3_MX1609_0_CH_1	0,677	0
4_400_TESTE3_MX1609_0_CH_2	0,841	0
4_400_TESTE3_MX1609_0_CH_3	0,928	0
4_400_TESTE3_MX1609_0_CH_4	0,977	0
SEM_TRATAMENTO_TESTE1_MX1609_0_CH_1	0,687	0
SEM_TRATAMENTO_TESTE1_MX1609_0_CH_2	0,966	0

SEM_TRATAMENTO_TESTE1_MX1609_0_CH_3	0,889	0
SEM_TRATAMENTO_TESTE1_MX1609_0_CH_4	0,958	0

Fonte: da pesquisa.

A análise de normalidade dos dados térmicos, realizada por meio do teste de Shapiro-Wilk, revelou estatísticas que variam entre 0,390 e 0,989, evidenciando diferentes níveis de aderência à distribuição normal. Em todas as medições, o p-valor foi igual a zero, o que implica rejeição da hipótese nula de normalidade. Na prática, isso indica que nenhuma das distribuições de temperatura pode ser considerada normalmente distribuída. Observa-se que algumas medições apresentaram estatísticas superiores a 0,95, sugerindo uma aproximação com a normalidade, embora ainda insuficiente para a aceitação do teste. Por outro lado, medições com estatísticas inferiores a 0,7 demonstram um desvio acentuado da normalidade, o que reforça a necessidade de utilizar métodos estatísticos não paramétricos na comparação entre grupos.

#### 4.1.1 Consequências da análise

Os resultados indicam que as distribuições de temperatura não seguem uma distribuição normal. Isso impacta diretamente a escolha dos testes estatísticos a serem utilizados. Em vez de aplicar testes paramétricos como a ANOVA, será necessário utilizar testes não paramétricos, como o teste de Kruskal-Wallis, para avaliar se há diferenças significativas entre as temperaturas medidas sob diferentes condições de tratamento da ferramenta.

#### 4.1.2 Comparação das temperaturas entre tratamentos

O teste de Kruskal-Wallis foi utilizado para verificar se há diferenças estatisticamente significativas entre as temperaturas medidas nas ferramentas com e sem tratamento. Como os dados não seguem uma distribuição normal, esse teste não paramétrico foi escolhido, pois permite comparar as distribuições sem a necessidade de pressupor normalidade. A análise das médias de temperatura, apresentadas na Tabela 7, e das distribuições entre os grupos permite avaliar se os tratamentos

aplicados ao gume da ferramenta impactam a temperatura gerada no processo de fresamento.

Tabela 7 – Médias de temperatura por canal e teste

Teste	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4
1_300_TESTE1	23,661	23,675	23,268	22,381
1_300_TESTE2	23,357	23,590	23,351	22,003
1_300_TESTE3	23,887	23,684	23,573	21,373
4_400_TESTE1	23,301	23,312	23,294	21,739
4_400_TESTE2	23,355	23,513	23,331	21,709
4_400_TESTE3	23,797	23,729	23,367	21,920
SEM_TRATAMENTO_TESTE1	24,431	24,236	24,068	21,531

Fonte: da pesquisa.

A tabela apresenta as médias das temperaturas registradas nos quatro canais de medição para cada repetição de teste dos tratamentos analisados. Nota-se que, em geral, as temperaturas médias das ferramentas tratadas (HSC 1/300 e H 4/400) são ligeiramente menores em comparação com a ferramenta sem tratamento, especialmente nos canais 1, 2 e 3. O canal 4 apresenta valores mais baixos de temperatura em todos os casos, indicando um possível padrão de dissipação térmica na peça de trabalho. Para confirmar se a diferença entre os grupos é estatisticamente relevante, aplicou-se o teste de Kruskal-Wallis, cujo resultado é exposto na Tabela 8.

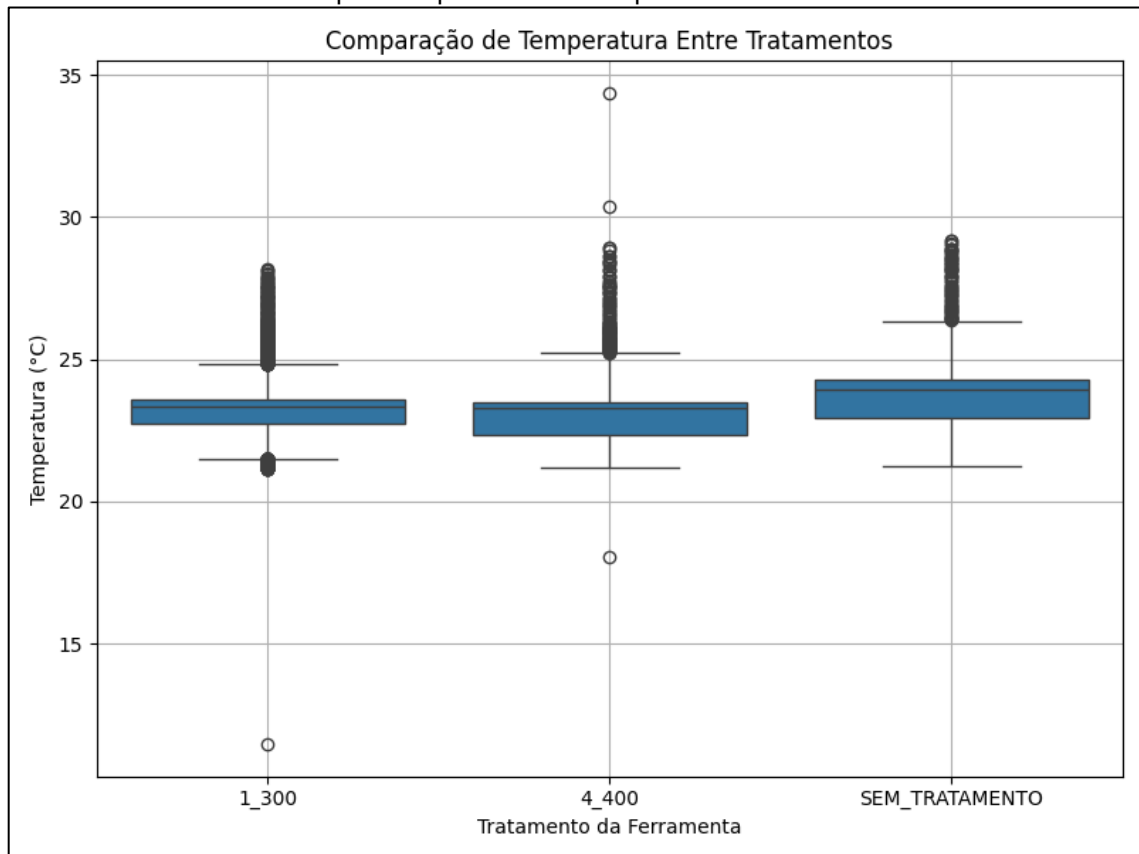
Tabela 8 – Resultado do teste de Kruskal-Wallis

Estatística	p-valor
1903,863	0

Fonte: da pesquisa.

O teste de Kruskal-Wallis indicou um p-valor de 0, o que significa que há uma diferença estatisticamente significativa entre pelo menos um dos grupos analisados. Isso sugere que o tratamento de gume influencia as temperaturas registradas durante o processo de fresamento. A distribuição das temperaturas para cada tratamento é ilustrada comparativamente por meio do boxplot no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Boxplot comparativo das temperaturas entre os tratamentos



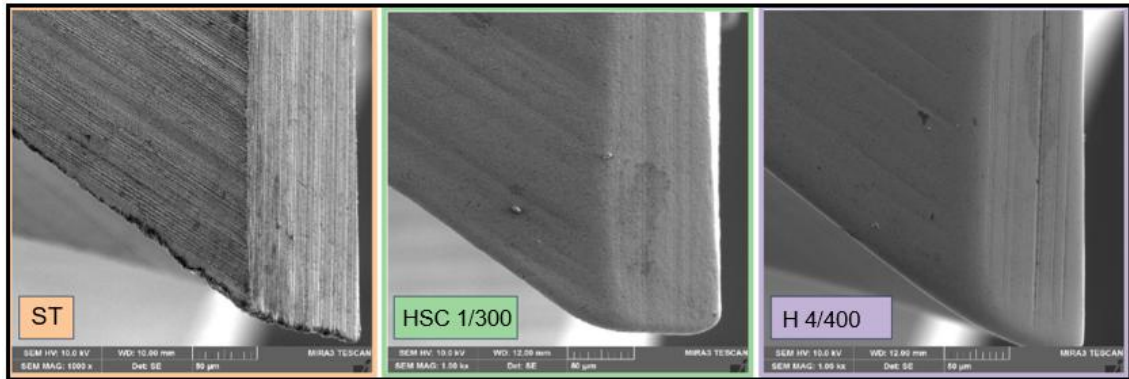
Fonte: da pesquisa.

O boxplot exibe a distribuição das temperaturas medidas para os três tipos de ferramentas: HSC 1/300, H 4/400 e SEM TRATAMENTO. Observa-se que os valores medianos são semelhantes entre os tratamentos, com pequenas variações. No entanto, há uma grande quantidade de valores discrepantes (outliers) acima dos quartis superiores, especialmente no tratamento 4\_400. Isso sugere que, apesar das médias serem próximas, há uma variabilidade significativa nos valores de temperatura registrados para todos os tratamentos.

Na Figura 34 podem ser analisadas as arestas de corte de cada tipo de ferramenta. A condição sem tratamento (ST) apresenta um raio pequeno com alto desvio padrão, além de defeitos visíveis no gume, como lascamentos e marcas do rebolo, indicando uma superfície irregular e pouco controlada. Com o tratamento HSC 1/300, observa-se uma melhora significativa na qualidade da superfície, redução dos defeitos, aumento do raio e diminuição do desvio padrão, o que demonstra maior uniformidade e acabamento. Já no tratamento H 4/400, há uma redução ainda mais expressiva da maioria dos defeitos e um desvio padrão menor para o raio,

evidenciando um processo mais estável e preciso, com acabamento superior em relação às condições anteriores.

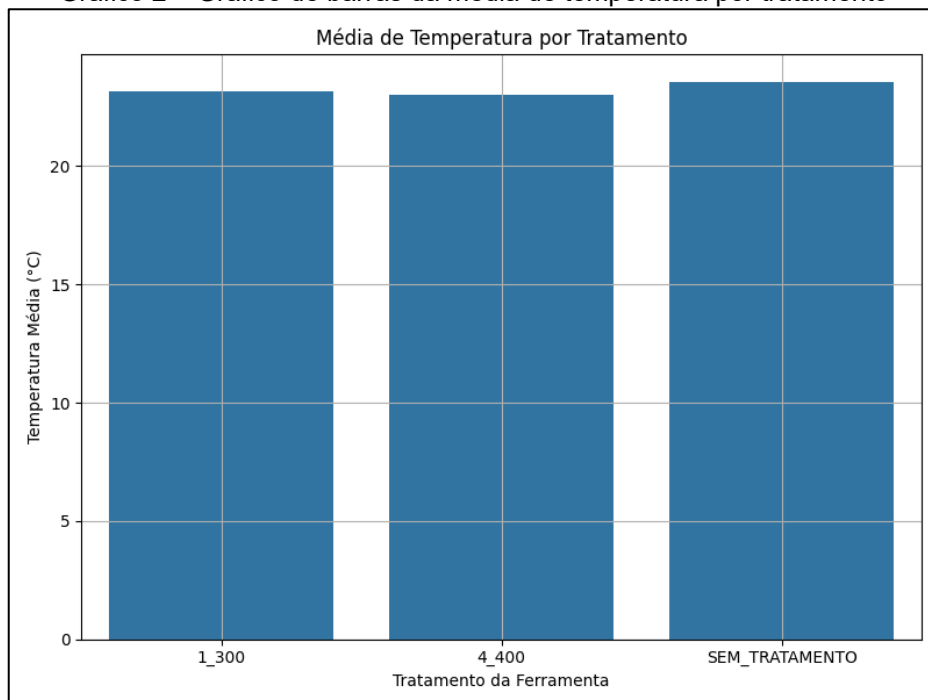
Figura 34 – Arestas de corte das ferramentas



Fonte: da pesquisa.

Além disso, nota-se que a ferramenta sem tratamento apresenta uma leve tendência a temperaturas mais elevadas, como indicado pela posição de sua mediana ligeiramente acima das ferramentas tratadas. Essa tendência de aquecimento na ferramenta sem tratamento é reforçada pela análise das temperaturas médias, apresentadas no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Gráfico de barras da média de temperatura por tratamento



Fonte: da pesquisa.

O gráfico de barras apresenta as médias de temperatura para cada tratamento de gume. A ferramenta sem tratamento apresenta a maior média de temperatura, enquanto as ferramentas tratadas exibem médias inferiores, com pequenas variações entre os tratamentos HSC 1/300 e H 4/400.

#### **4.1.3 Discussões**

Os resultados indicam que o tratamento de gume influencia as temperaturas registradas no processo de fresamento, embora a magnitude da diferença seja pequena.

O teste de Kruskal-Wallis mostrou diferença estatisticamente significativa entre os grupos, mas as médias de temperatura variam apenas de forma sutil. Isso acontece porque o tratamento de gume reduz atrito e deformação na zona de corte, diminuindo a geração de calor, porém esse efeito é limitado diante das principais fontes térmicas da usinagem, como cisalhamento e fricção. Além disso, a temperatura média da peça é influenciada pela massa e condutividade do material, que dissipam rapidamente o calor local, suavizando diferenças. O teste estatístico é sensível a variações na distribuição, e com dados consistentes mesmo diferenças pequenas podem se tornar significativas. Em termos práticos, o impacto do tratamento sobre a temperatura é real, mas pequeno, sendo mais relevante para vida útil da ferramenta e qualidade superficial do que para controle térmico da peça.

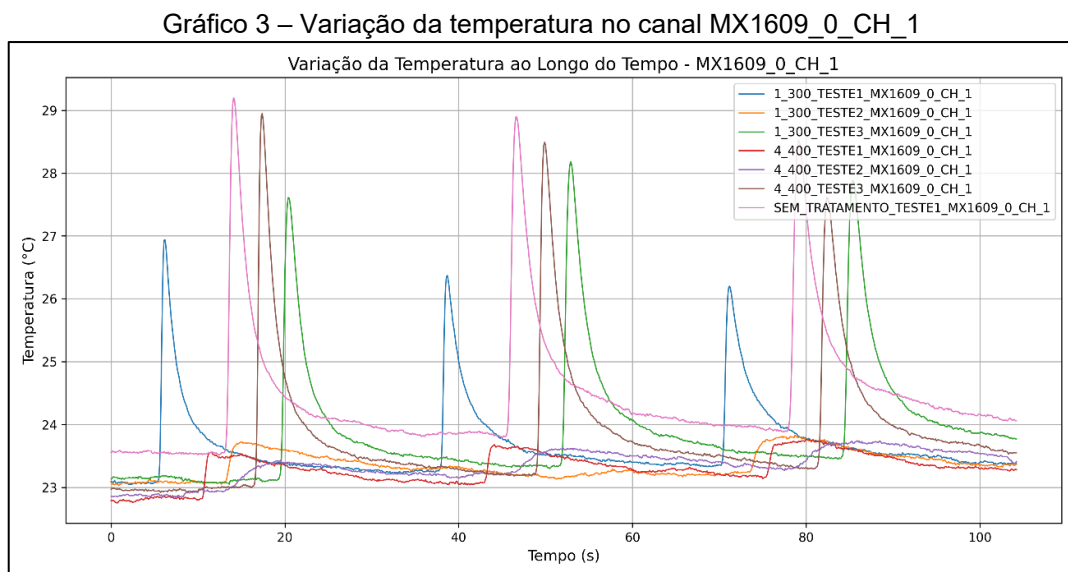
O boxplot revelou uma quantidade considerável de valores discrepantes (outliers), especialmente no tratamento 4\_400, o que indica que algumas medições apresentaram temperaturas significativamente mais altas. Isso pode ser um reflexo de variações no processo de corte, na dissipação térmica ou em fatores externos, como pequenos desalinhamentos ou variações na condição da ferramenta durante os testes.

Embora o efeito do tratamento não seja acentuado como esperado, os dados sustentam a hipótese inicial do estudo de que o polimento do gume da ferramenta pode contribuir para a redução da temperatura durante o fresamento. Essa diferença, ainda que sutil (0,68 a 0,80 °C) pode ser relevante para a durabilidade da ferramenta e a qualidade da peça usinada, fatores essenciais para um processo de usinagem eficiente.

#### 4.1.4 Análise da variação da temperatura ao longo do corte

A análise de variação da temperatura ao longo do tempo tem como objetivo identificar tendências térmicas nos diferentes pontos da peça durante o fresamento. Isso permite verificar como a temperatura se comporta em função do tempo, observando picos, estabilizações e oscilações térmicas que podem estar associadas a diferentes tratamentos de gume aplicados às ferramentas.

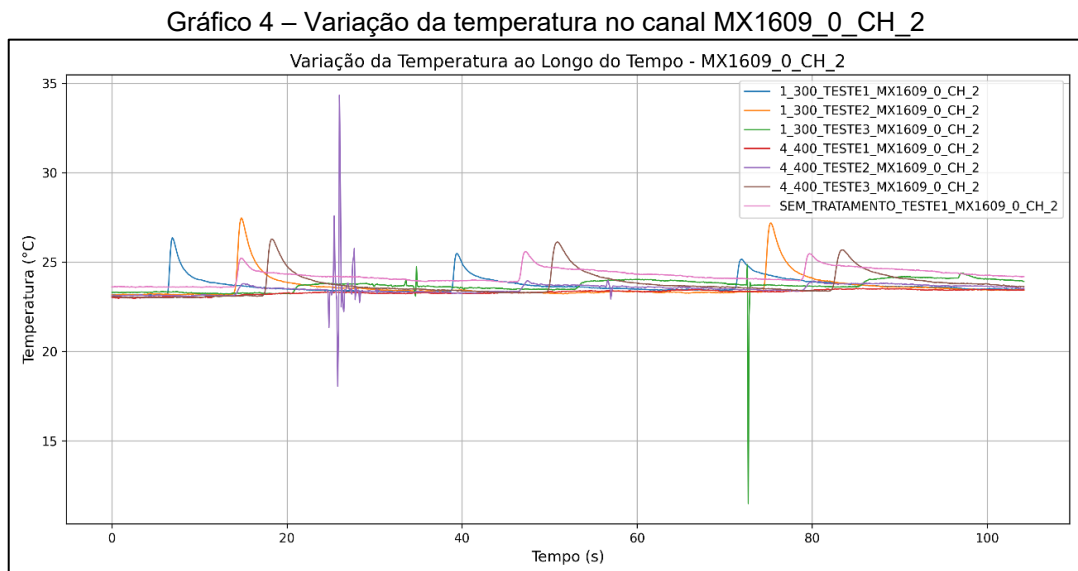
A temperatura da peça de trabalho é um fator crítico na usinagem, pois pode influenciar o desgaste da ferramenta, a qualidade superficial da peça e a estabilidade do processo. Compreender como a temperatura varia em diferentes pontos permite otimizar os parâmetros de corte e os tratamentos aplicados às ferramentas. A análise começa com a evolução da temperatura registrada no primeiro canal de medição (CH\_1), apresentada no Gráfico 3.



Fonte: da pesquisa.

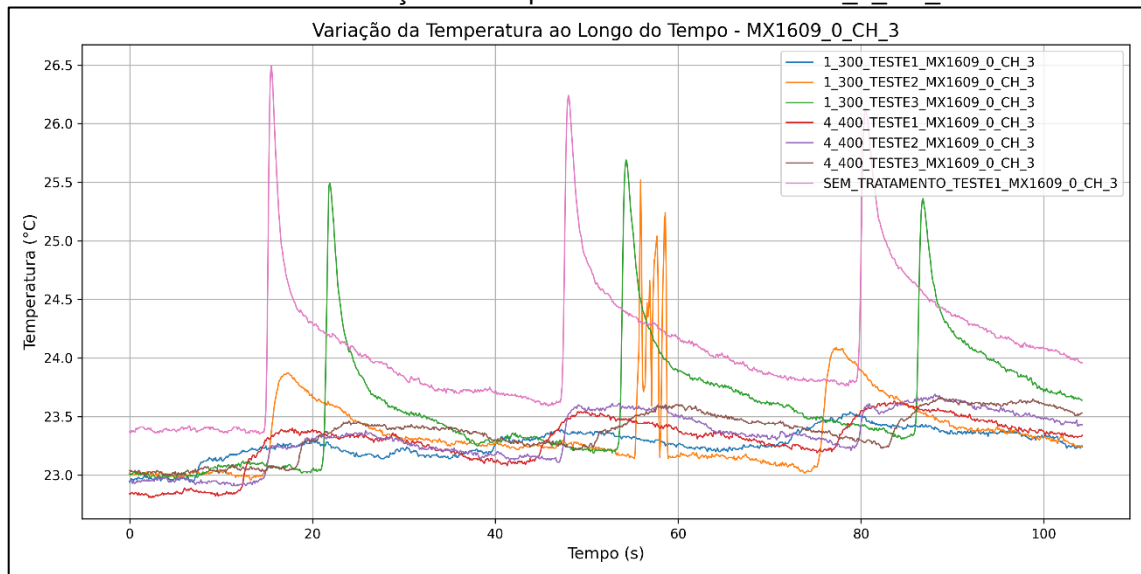
A análise do gráfico referente ao Canal CH\_1 evidencia a variação da temperatura ao longo do tempo para os diferentes tratamentos de gume. Em todos os casos, observa-se um comportamento cíclico caracterizado por picos de temperatura seguidos por fases de resfriamento gradual. Entre os grupos avaliados, o tratamento SEM\_TRATAMENTO apresenta os picos térmicos mais elevados, indicando maior acúmulo de calor durante o processo, enquanto os tratamentos 1\_300 e 4\_400 demonstram desempenho térmico mais equilibrado. Embora a temperatura inicial e os valores de estabilização final sejam semelhantes entre os testes, as diferenças nos

picos de temperatura sugerem variações no comportamento de dissipação térmica, possivelmente relacionadas às modificações aplicadas no gume das ferramentas. A análise prossegue para o segundo ponto de medição (Canal CH\_2), conforme ilustrado no Gráfico 4. O maior valor de temperatura registrado foi 24,431 °C e o menor foi 21,373 °C, resultando em uma diferença absoluta de 3,058 °C. Essa variação corresponde a aproximadamente 14,3% em relação ao menor valor, 12,5% em relação ao maior e cerca de 13,4% considerando a média dos dois extremos. Essa amplitude indica que, embora as médias gerais sejam próximas, há um desvio relevante, principalmente associado ao Canal 4, que tende a apresentar leituras mais baixas e pode influenciar a interpretação dos resultados.



Fonte: da pesquisa.

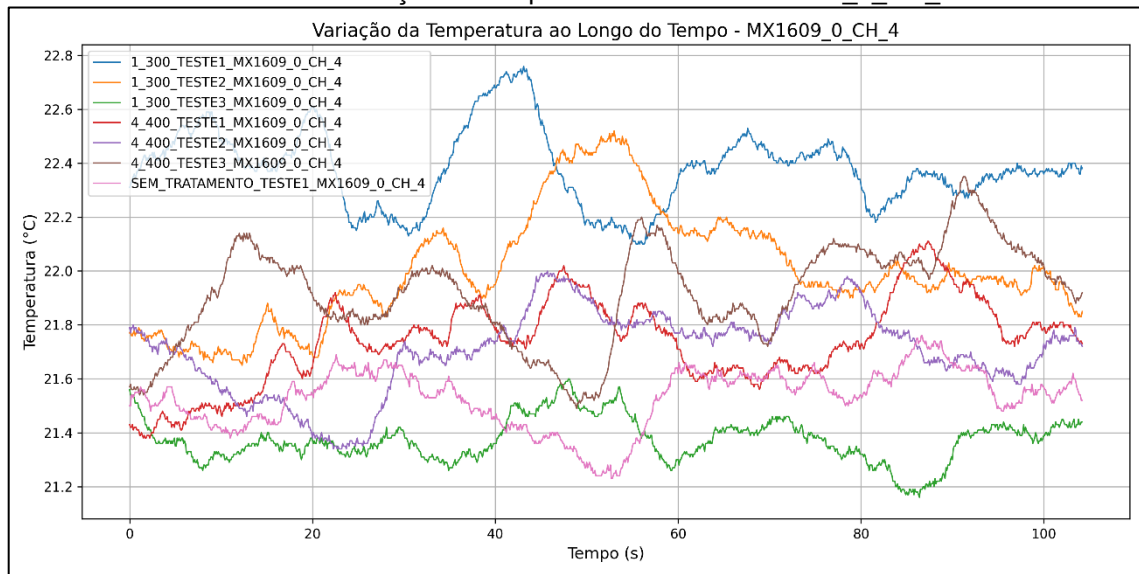
Gráfico 5 – Variação da temperatura no canal MX1609\_0\_CH\_3



Fonte: da pesquisa.

A leitura de temperatura realizada pelo Canal CH\_3 revela um comportamento intermediário em relação aos canais CH\_1 e CH\_2, combinando certa estabilidade com a presença de picos térmicos moderados. O tratamento SEM\_TRATAMENTO continua a apresentar os valores máximos mais elevados, reforçando a tendência de maior geração de calor quando o gume da ferramenta não é polido isso porque gera-se mais calor porque o gume áspero aumenta o atrito e dificulta a remoção de cavacos, concentrando energia na zona de corte. A oscilação térmica ao longo do tempo apresenta um padrão semelhante ao observado no Canal CH\_1, embora com picos de menor intensidade. Em contraste, os tratamentos 1\_300 e 4\_400 mantêm um comportamento mais estável e controlado, com amplitudes térmicas reduzidas, sugerindo maior eficiência na dissipação de calor nessa região específica da peça. Assim, a análise do último ponto de medição (Canal CH\_4) é detalhada no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Variação da temperatura no canal MX1609\_0\_CH\_4



Fonte: da pesquisa.

O gráfico referente ao Canal CH\_4 revela um comportamento térmico distinto dos demais pontos analisados, caracterizado por menores variações oscilando aproximadamente entre 21,2 °C e 22,8 °C, o que representa uma diferença de cerca de 1,6 °C e um padrão oscilatório contínuo, sem picos acentuados. Observa-se uma tendência de elevação gradual da temperatura ao longo do tempo, sugerindo que essa região da peça pode funcionar como uma zona de acúmulo térmico. Embora os efeitos dos diferentes tratamentos de gume também sejam perceptíveis nesse canal, as diferenças entre eles são menos expressivas em comparação com os demais, indicando que o impacto do tratamento pode ser atenuado em áreas com menor exposição direta ao calor gerado pelo corte.

#### 4.1.5 Avaliação crítica dos resultados

De forma geral, os resultados obtidos evidenciam que a temperatura na peça varia significativamente ao longo do tempo, apresentando comportamentos distintos entre os diferentes pontos de medição. O Canal CH\_1 concentra os picos térmicos mais acentuados, indicando proximidade com a zona de corte e maior exposição ao calor gerado pela usinagem, o que já foi observado em estudos de medição térmica por termopar em fresamento, que associam picos localizados à dinâmica de corte e desgaste do gume (Lima, 2017). A menor temperatura registrada está próxima de 23,0

°C. Essa faixa aparece nas linhas mais baixas antes dos picos, indicando o valor mínimo durante os períodos de estabilidade.

Em contraste, o Canal CH\_2 exibe variação térmica reduzida, sugerindo estar mais afastado da região de contato direto com a ferramenta, cenário semelhante à distribuição térmica mais estável apontada em trabalhos que empregam termografia direcional espectral para identificar zonas menos críticas no processo (Moreira, 2021).

Já o Canal CH\_3 apresenta comportamento intermediário, enquanto o CH\_4 destaca-se por um aumento gradual e contínuo da temperatura, possivelmente relacionado ao acúmulo térmico em áreas com menor ventilação ou dissipação de calor, conforme modelagens de fluxo térmico indicam zonas de calor concentradas em regiões confinadas da peça (Barreiros, 2018).

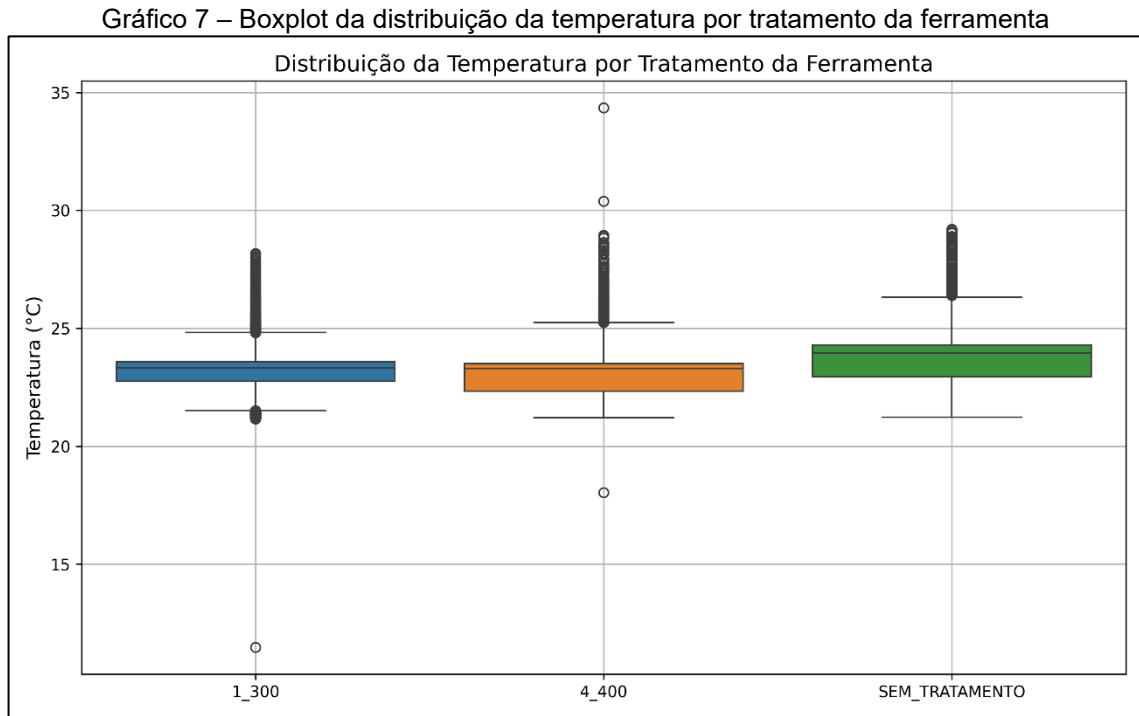
Além disso, observou-se que a condição SEM\_TRATAMENTO resulta nos picos mais elevados em todos os canais, reforçando a hipótese de que a ausência de polimento no gume da ferramenta contribui para um maior acúmulo de calor durante o processo de usinagem — resultado consistente com dados que mostram superfícies ásperas associadas a maior geração de calor e instabilidade térmica (Coelho *et al.*, 2021).

Esses achados reforçam a importância de monitorar a temperatura ao longo do tempo — não apenas em pontos estratégicos — para compreender como diferentes tratamentos de gume influenciam a dissipação térmica na peça usinada. Os resultados podem fundamentar ajustes nos parâmetros de corte, otimizar a escolha das ferramentas e aprimorar o controle térmico durante o fresamento, contribuindo para melhorar a eficiência e a qualidade do processo em ambientes industriais.

#### **4.1.6 Teste ANOVA/Kruskal-Wallis**

Com o intuito de avaliar o impacto dos diferentes tratamentos de gume sobre a temperatura gerada durante a usinagem, foi realizada uma análise estatística entre os grupos de ferramentas. Devido à ausência de normalidade nos dados, optou-se pelo uso do teste de Kruskal-Wallis, uma abordagem não paramétrica adequada para a comparação de múltiplos grupos independentes. O resultado do teste revelou uma estatística de 1903,863 e um p-valor igual a 0,000, indicando a existência de diferença estatisticamente significativa entre pelo menos um dos tratamentos avaliados. Esse resultado confirma que o tipo de tratamento aplicado ao gume da ferramenta exerce

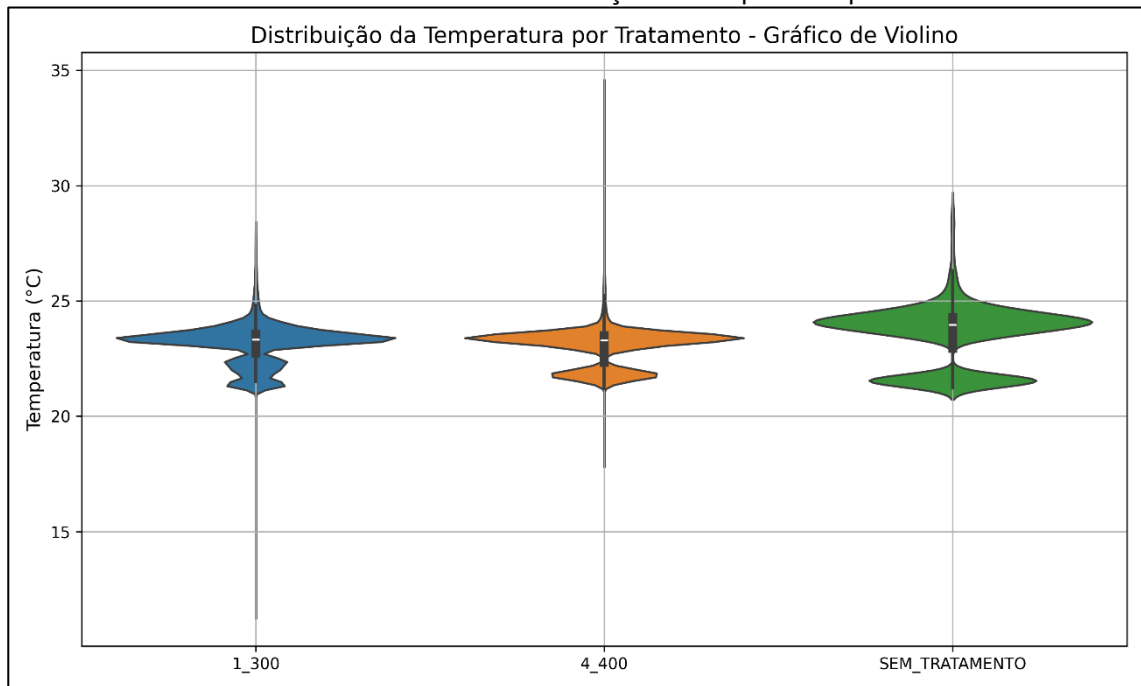
influência direta sobre a temperatura da peça, reforçando a relevância do acabamento do gume no controle térmico do processo de usinagem. A distribuição das temperaturas que leva a essa diferença significativa é ilustrada comparativamente no Gráfico 7.



Fonte: da pesquisa.

A análise do boxplot das temperaturas permite visualizar a distribuição térmica associada a cada tratamento de gume das ferramentas — 1\_300, 4\_400 e SEM\_TRATAMENTO. Observa-se que as medianas apresentam pequenas variações entre os grupos, sugerindo que cada tratamento influencia de forma distinta a dissipação de calor durante a usinagem. O tratamento SEM\_TRATAMENTO se destaca por exibir a mediana mais elevada, reforçando a tendência de maior acúmulo térmico quando o gume da ferramenta não recebe acabamento. Além disso, a presença de valores discrepantes (outliers) em todas as condições analisadas indica que há variações pontuais de temperatura ao longo do processo, possivelmente associadas a flutuações no contato ferramenta/peça ou em características do material usinado. Para uma visualização mais aprofundada da densidade e da forma da distribuição dos dados, complementar à análise do boxplot, apresenta-se o Gráfico 8.

Gráfico 8 – Gráfico de violino da distribuição da temperatura por tratamento



Fonte: da pesquisa.

O gráfico de violino oferece uma análise detalhada da distribuição das temperaturas associadas a cada tratamento de gume das ferramentas, evidenciando a densidade dos valores ao longo do intervalo medido. Regiões mais largas na curva correspondem a concentrações maiores de medições em determinados níveis de temperatura. Observa-se que a condição SEM\_TRATAMENTO apresenta uma distribuição mais ampla, indicando maior variabilidade térmica durante o processo de usinagem. Em contrapartida, os tratamentos 1\_300 e 4\_400 exibem distribuições mais concentradas, o que sugere um controle térmico mais consistente e estável nesses casos, refletindo a eficácia do acabamento do gume na redução das flutuações de temperatura.

#### 4.1.7 Avaliação crítica dos resultados

Os resultados obtidos evidenciam que o tratamento aplicado ao gume da ferramenta exerce influência significativa sobre a temperatura da peça durante o fresamento. A análise estatística por meio do teste de Kruskal-Wallis confirmou diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos, validando a hipótese de que o estado superficial do gume afeta diretamente o comportamento térmico durante a usinagem. Esse achado está de acordo com os resultados de Lima (2017),

que demonstrou que ferramentas com desgaste ou acabamento inadequado tendem a gerar maiores elevações térmicas, impactando diretamente o desempenho do corte.

A visualização gráfica por boxplots e violinos reforçou essa conclusão: a ferramenta sem tratamento (SEM\_TRATAMENTO) apresentou maiores temperaturas médias e maior dispersão dos dados, comportamento que reflete a maior rugosidade e a possibilidade de melhoria no controle da geometria do gume. Esse padrão é semelhante ao observado por Coelho *et al.* (2021), que relataram aumento na geração de calor e na instabilidade térmica em ferramentas com superfícies mais ásperas. Já os tratamentos 1\_300 e 4\_400 apresentaram distribuições térmicas mais estáveis e concentradas, sugerindo melhor dissipação térmica, tal como descrito por Silva *et al.* (2019), que associaram o polimento do gume à redução das variações térmicas e ao controle de picos de temperatura durante o fresamento de aços endurecidos.

Além disso, Barreiros (2018) e Moreira (2021) mostraram que a geometria otimizada da ferramenta e a uniformidade do acabamento contribuem para o controle da propagação do calor ao longo do tempo, o que se alinha ao comportamento observado nos tratamentos polidos deste estudo. Em termos práticos, o uso de ferramentas sem tratamento pode resultar em picos térmicos mais intensos, acelerando o desgaste da ferramenta e elevando o risco de danos térmicos na peça. Por outro lado, os tratamentos 1\_300 e 4\_400 não apenas favorecem uma dissipação de calor mais eficiente, como também prolongam a vida útil da ferramenta e contribuem para uma melhor qualidade superficial da peça usinada.

#### **4.1.8 Regressão linear múltipla**

Esta análise tem como objetivo identificar a relação entre o tempo, a temperatura e o tratamento da ferramenta utilizado na usinagem. A regressão linear múltipla foi aplicada para determinar se o tempo e o tratamento influenciam significativamente a temperatura da peça de trabalho.

Os coeficientes obtidos permitem entender a tendência da temperatura ao longo do tempo e como os diferentes tratamentos de gume afetam essa variação.

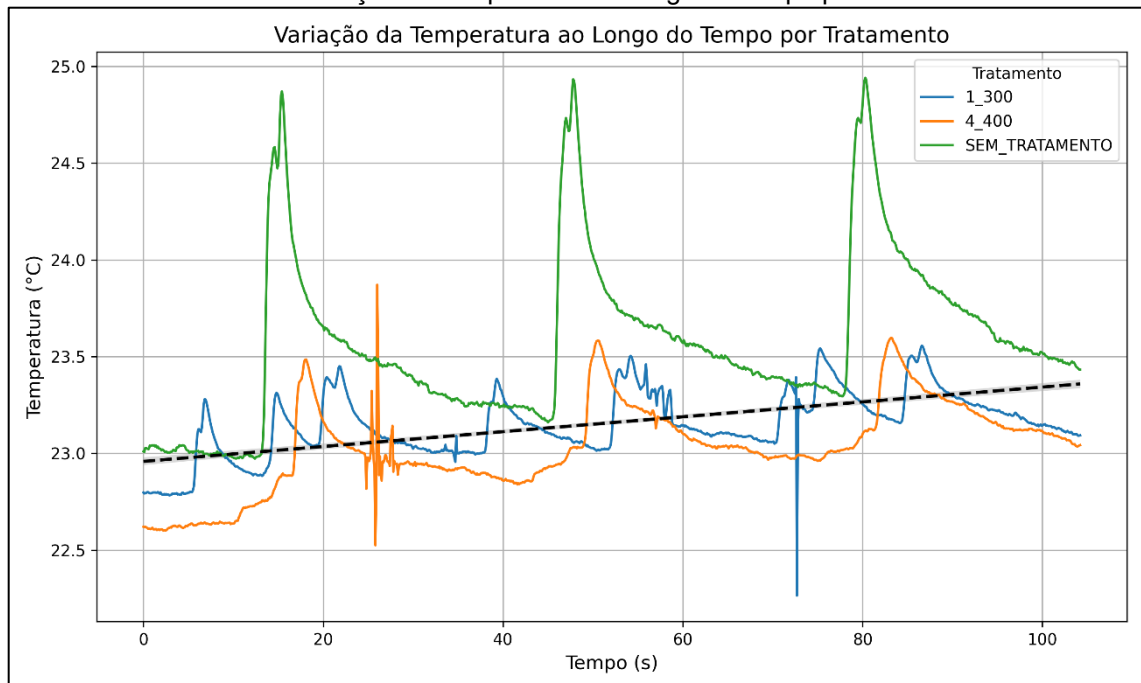
Tabela 9 – Resultados da regressão linear entre tempo, tratamento e temperatura

Variável	Coefficiente	Erro Padrão	p-valor
Intercepto	22,868	0,013	0,000
Tempo	0,004	0,000	0,000
Tratamento	0,126	0,008	0,000

Fonte: da pesquisa.

A análise da Tabela 9 revela que o coeficiente associado ao tempo (0,004) indica uma tendência de aumento gradual da temperatura ao longo do processo de fresamento, possivelmente decorrente do aquecimento progressivo da peça. Além disso, o coeficiente relacionado ao tratamento da ferramenta (0,126) evidencia um impacto significativo desse fator sobre a temperatura registrada na peça. Os p-valores, todos iguais a zero, confirmam que tanto o tempo quanto o tratamento exercem influência estatisticamente significativa na variação térmica observada, ressaltando a importância de considerar esses parâmetros para o controle eficiente do calor gerado durante a usinagem. A representação visual dessa relação, mostrando a evolução da temperatura ao longo do tempo para cada tratamento, é apresentada no Gráfico 9.

Gráfico 9 – Variação da temperatura ao longo do tempo por tratamento



Fonte: da pesquisa.

O gráfico apresenta as curvas de variação da temperatura ao longo do tempo para cada tratamento de ferramenta, com as cores diferenciando os grupos analisados: azul para a ferramenta com polimento HSC 1/300, laranja para o polimento

H 4/400 e verde para a ferramenta sem tratamento. A linha preta tracejada ilustra a tendência geral de aumento térmico durante o processo. Observam-se picos de temperatura que provavelmente correspondem aos momentos de maior carga térmica na usinagem. Além disso, a temperatura média ao longo do tempo varia entre os tratamentos, sugerindo que o polimento do gume exerce influência direta na eficiência da dissipação térmica durante o fresamento.

A temperatura média ao longo do tempo diferencia-se entre os tratamentos, indicando que o polimento da ferramenta pode influenciar a dissipação térmica.

#### **4.1.9 Avaliação crítica dos resultados**

Uma hipótese consistente para o comportamento térmico observado no gráfico é que a condição SEM\_TRATAMENTO (verde) apresenta picos de temperatura mais acentuados devido à rugosidade e geometria irregular do gume, o que aumenta a área de contato e eleva o atrito entre ferramenta e peça. Em contraste, o polimento com o tratamento H 4/400 (laranja) produz um gume mais liso, resultando na redução da área efetiva de contato e maior eficiência térmica, o que se reflete em temperaturas mais baixas e estáveis ao longo do tempo. A tendência de aumento gradual da temperatura média, evidenciada pela linha preta, corrobora a literatura, que aponta para o aquecimento progressivo da peça durante o fresamento (Silva *et al.*, 2019).

Essa hipótese encontra respaldo na dissertação de Lima (2017), que analisou o fresamento do aço-ferramenta ABNT D2 e identificou que o desgaste do gume provoca aumento da temperatura de usinagem, especialmente quando não há tratamento superficial adequado. De forma complementar, Andrade (2014) demonstrou que regiões com menor capacidade de dissipação térmica exibem picos de temperatura mais pronunciados, resultado direto da geometria e do estado superficial da ferramenta.

Além disso, conforme estudo publicado na Revista Máquinas e Metais (Aranda, 2014), o uso de condições que favorecem a dissipação de calor, como canais de refrigeração ou otimizações na geometria da ferramenta, reduz significativamente os picos térmicos e melhora a estabilidade térmica do processo. Embora o experimento em questão tenha sido conduzido a seco, pode-se inferir que o polimento da aresta oferece efeito análogo ao reduzir atrito e facilitar a dissipação térmica.

Assim, o comportamento mais estável observado com o tratamento H 4/400 está de acordo com o entendimento de que uma aresta otimizada geometricamente contribui para o controle térmico, minimizando os efeitos de aquecimento progressivo e de picos de temperatura durante a usinagem.

#### 4.2 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR TERMOPAR INSERIDO NA FERRAMENTA

A análise descritiva das medições realizadas com termopar inserido na ferramenta tem como objetivo fornecer um panorama inicial sobre os dados coletados durante os ensaios de usinagem, destacando as principais estatísticas de tendência central e dispersão para cada condição avaliada. Foram analisadas as temperaturas registradas em três repetições para a ferramenta tratada com H 4/400, três repetições para a ferramenta tratada com HSC 1/300, além do conjunto de dados referente à ferramenta sem tratamento. Para cada conjunto de dados foram calculadas a média, a mediana, o desvio padrão, o valor mínimo e o valor máximo. Esses parâmetros, cujos valores estão consolidados na Tabela 10, fornecem um entendimento quantitativo da distribuição dos valores de temperatura observados, sendo fundamentais para subsidiar análises posteriores sobre a influência do tratamento do gume na dissipação térmica durante o processo de fresamento.

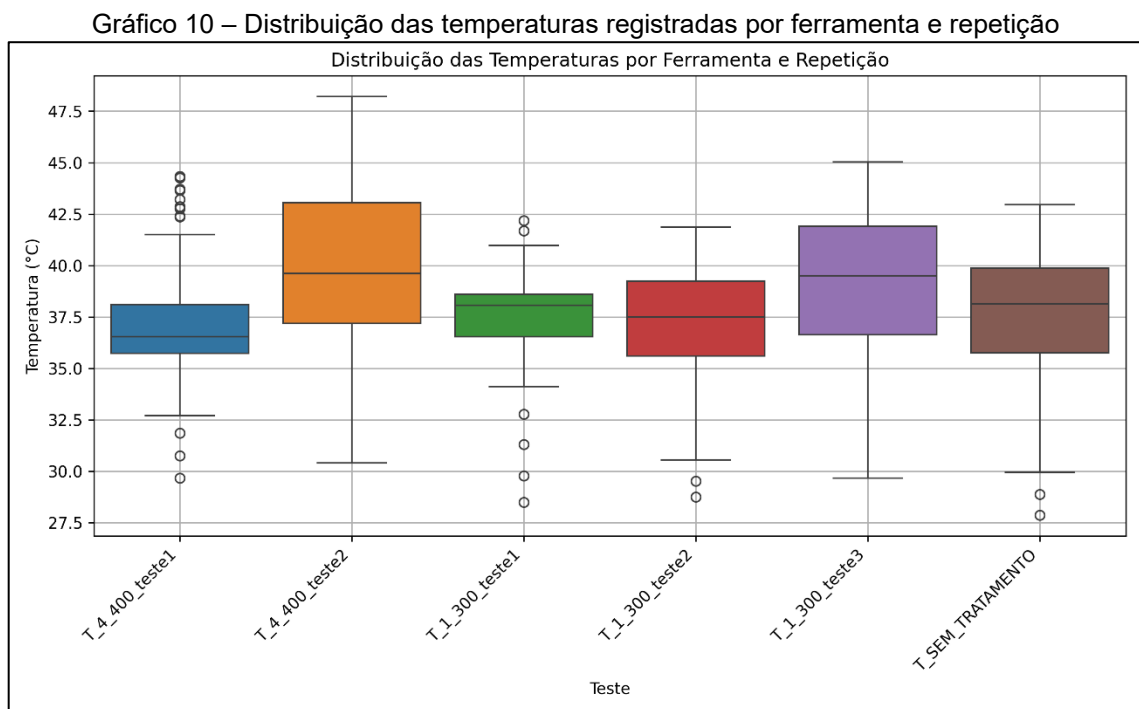
Tabela 10 – Estatísticas descritivas das temperaturas registradas

	<b>Média</b>	<b>Mediana</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>Faixa_Tempo</b>	<b>62</b>	<b>62</b>	<b>34,35113</b>	<b>4</b>	<b>120</b>
T_4_400_teste1	37,334	36,545	3,328	29,675	44,325
T_4_400_teste2	40,268	39,614	4,563	30,4	48,2
T_1_300_teste1	37,380	38,068	2,544	28,5	42,175
T_1_300_teste2	37,084	37,5	3,021	28,75	41,875
T_1_300_teste3	39,120	39,5	3,771	29,667	45,023
T_SEM_TRATAMENTO	37,614	38,136	3,467	27,875	42,955

Fonte: da pesquisa.

A temperatura média registrada variou entre 37,08°C e 40,27°C, com a maior média observada na repetição T\_4\_400\_teste2 (40,27°C) e a menor em T\_1\_300\_teste2 (37,08°C). A mediana dos valores seguiu tendência semelhante,

apresentando valores próximos às médias, com variações entre 36,54°C e 39,61°C. O desvio padrão variou de 2,54°C (T\_1\_300\_teste1) a 4,56°C (T\_4\_400\_teste2), indicando que a dispersão dos valores de temperatura foi mais acentuada nos testes realizados com a ferramenta tratada com H 4/400. Os valores mínimos e máximos registrados confirmam a amplitude da variação da temperatura durante os testes, com a menor temperatura sendo 27,87°C (ferramenta sem tratamento) e a maior atingindo 48,20°C (T\_4\_400\_teste2). A distribuição desses valores para cada ensaio pode ser analisada visualmente no Gráfico 10.



Fonte: da pesquisa.

A distribuição dos valores de temperatura entre os diferentes tratamentos pode ser visualizada no gráfico de boxplot. Observa-se uma dispersão variável entre os conjuntos de dados, com algumas repetições apresentando maior concentração dos valores ao redor da mediana, enquanto outras demonstram uma amplitude mais significativa. A ferramenta tratada com H 4/400 apresentou maior variação entre os ensaios, especialmente na repetição T\_4\_400\_teste2, onde a temperatura máxima foi a mais elevada entre todas as condições analisadas. Já os testes com a ferramenta tratada com HSC 1/300 e a ferramenta sem tratamento apresentaram uma distribuição mais uniforme, com variações menores nos extremos.

#### 4.2.1 Discussão e interpretação dos resultados

A análise dos dados sugere que a temperatura registrada durante o fresamento variou conforme a condição da ferramenta, sendo possível identificar diferenças entre os tratamentos aplicados. A ferramenta tratada com H 4/400 apresentou maior variação nos valores de temperatura, com uma repetição (T\_4\_400\_teste2) registrando a temperatura máxima 48,20 °C mais elevada entre todas as condições analisadas. Essa dispersão pode estar associada à influência do polimento na dissipação térmica, embora a amplitude dos valores indique que outros fatores também podem estar influenciando os resultados.

Por outro lado, a ferramenta tratada com HSC 1/300 apresentou uma distribuição de temperatura mais homogênea entre as repetições, com médias e medianas relativamente próximas entre si. Isso pode indicar um comportamento mais estável em termos de variação térmica, possivelmente relacionado à composição da mídia utilizada no tratamento. A ferramenta sem tratamento apresentou temperaturas dentro da faixa esperada, com valores médios e dispersão intermediários em relação às ferramentas polidas.

Uma hipótese plausível para o comportamento térmico observado é que o tratamento HSC 1/300 resulta em um acabamento mais uniforme no gume da ferramenta, promovendo uma geometria de corte mais estável e uma área de contato mais controlada entre a ferramenta e a peça. Esse polimento reduz microasperidades e irregularidades superficiais, diminuindo o atrito e, conseqüentemente, a geração de calor localizada. Estudos como o de Guerra (2019) demonstraram que ferramentas polidas apresentam menor dispersão térmica, indicando uma dissipação de calor mais eficiente. Além disso, a composição da mídia abrasiva utilizada no tratamento HSC 1/300 pode influenciar as propriedades superficiais da ferramenta, como dureza e resistência ao desgaste, fatores que também contribuem para a estabilidade térmica observada. Por outro lado, a ferramenta sem tratamento, com superfície mais áspera e variabilidade geométrica maior, gera interação térmica menos controlada, resultando em dispersão intermediária da temperatura, conforme evidenciado por Oliveira (2017), que associou maior rugosidade a variações térmicas e desgaste irregular da ferramenta.

Os resultados iniciais evidenciam a necessidade de aprofundamento na análise estatística para verificar se as diferenças observadas são estatisticamente

significativas. Além disso, a compreensão do impacto do polimento na temperatura de usinagem poderá ser aprimorada por meio da comparação com outras variáveis do processo, como o desgaste da ferramenta e a rugosidade da peça usinada.

#### 4.2.2 Análise estatística da comparação das ferramentas de usinagem

A comparação estatística entre as ferramentas foi realizada para identificar possíveis diferenças significativas entre os tratamentos aplicados. Para isso, foi conduzido o teste de ANOVA para as repetições que apresentaram distribuição normal e o teste de Kruskal-Wallis para aquelas em que a normalidade não foi confirmada. Essas análises, cujos resultados são apresentados na Tabela 11, permitem verificar se há variações estatisticamente relevantes nas temperaturas medidas entre as ferramentas, auxiliando na avaliação do impacto do tratamento do gume no comportamento térmico do processo de fresamento.

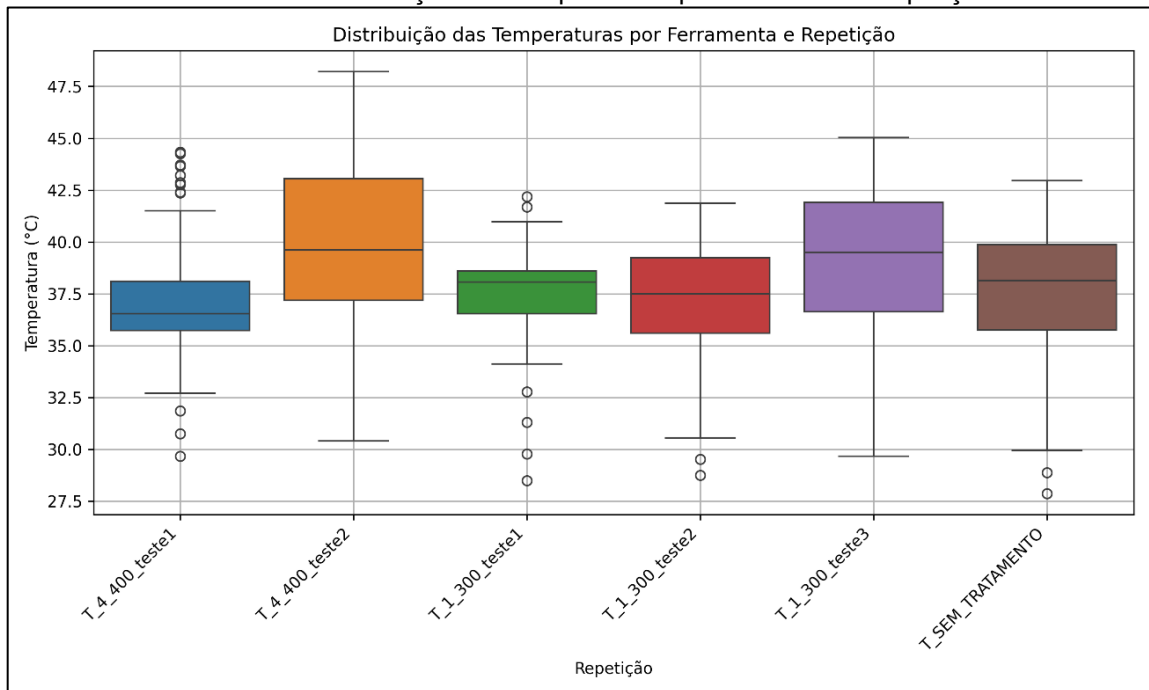
Tabela 11 – Resultados da comparação estatística das ferramentas

Repetições Comparadas	Teste Utilizado	Valor-p	Decisão
T_4_400_teste2 vs. T_1_300_teste3	ANOVA	0,139	Sem Diferença Significativa
T_4_400_teste1 vs. T_1_300_teste1 vs. T_1_300_teste2 vs. T_SEM_TRATAMENTO	Kruskal-Wallis	0,327	Sem Diferença Significativa

Fonte: da pesquisa.

Os testes estatísticos indicaram que não há diferenças significativas entre as ferramentas para nenhuma das repetições analisadas. O teste de ANOVA, aplicado às repetições T\_4\_400\_teste2 e T\_1\_300\_teste3, resultou em um valor de p de 0,139, o que não evidencia diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos. Da mesma forma, o teste de Kruskal-Wallis, realizado para as repetições T\_4\_400\_teste1, T\_1\_300\_teste1, T\_1\_300\_teste2 e T\_SEM\_TRATAMENTO, apresentou um valor de p de 0,327, indicando que as distribuições das temperaturas entre os diferentes tratamentos não diferem significativamente. A semelhança entre as distribuições pode ser observada de forma visual no Gráfico 11.

Gráfico 11 – Distribuição das temperaturas por ferramenta e repetição



Fonte: da pesquisa.

A distribuição dos valores de temperatura entre os tratamentos pode ser visualizada no gráfico de boxplot. As medianas das temperaturas registradas variam entre 36,54°C (T\_4\_400\_teste1) e 39,61°C (T\_4\_400\_teste2), demonstrando pequenas variações entre as repetições. A amplitude das temperaturas também varia conforme a repetição, com valores mínimos registrados entre 27,87°C (T\_SEM\_TRATAMENTO) e 30,40°C (T\_4\_400\_teste2), enquanto os valores máximos vão de 41,87°C (T\_1\_300\_teste2) a 48,20°C (T\_4\_400\_teste2). Observa-se que algumas repetições apresentam maior dispersão dos dados, evidenciada pela distância entre os quartis inferior e superior, enquanto outras possuem distribuição mais concentrada.

#### 4.2.3 Discussão e interpretação dos resultados

Os resultados obtidos indicam que não há diferença estatisticamente significativa entre as temperaturas registradas por termopar inserido nas ferramentas com e sem tratamento de gume. Tanto o teste ANOVA quanto o Kruskal-Wallis demonstraram que as médias e distribuições das temperaturas são estatisticamente semelhantes entre os grupos. A análise descritiva revelou pequenas variações entre as médias e medianas, mas a dispersão dos dados sugere que essas diferenças

podem decorrer de flutuações normais do processo, e não de efeito direto do polimento do gume. Além disso, a presença de outliers em algumas repetições sinaliza a necessidade de explorar fatores adicionais que possam influenciar a geração e dissipação de calor durante a usinagem.

Várias causas podem explicar a ausência de diferenças significativas quando se utiliza termopar na ferramenta, apesar de outros métodos do estudo terem identificado distinções térmicas claras. Primeiramente, a resposta térmica do termopar pode ser limitada pela transferência de calor do ponto de contato até o sensor, resultando em atenuação dos picos térmicos (Silva *et al.*, 2021). Em segundo lugar, a precisão da colocação do termopar e a uniformidade do contato térmico podem variar entre as ferramentas, introduzindo ruído que atenua diferenças sutis (Ferreira; Lima, 2020).

Além disso, a camuflagem de variações térmicas pode ocorrer devido à inércia térmica da ferramenta e da própria haste do termopar, que tendem a suavizar oscilações de curta duração (Wang *et al.*, 2023). Por fim, estudos como o de Martins *et al.* (2022) ressaltam que o tempo de resposta e a calibração adequada dos sensores são cruciais para capturar picos térmicos, especialmente em processos de usinagem dinâmicos, algo que pode não ter sido totalmente considerado nesta análise.

Dessa forma, ainda que a conclusão preliminar seja de que o polimento do gume não impactou significativamente a temperatura medida pelo termopar, a próxima etapa do estudo deve avaliar a complementação com a técnica de termografia infravermelha para aprofundar a compreensão da relação entre o tratamento da ferramenta e a dissipação térmica no fresamento.

### 4.3 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA POR CÂMERA TERMOGRÁFICA

A presente investigação foi conduzida com o objetivo de comparar a temperatura no gume de ferramentas de fresamento submetidas a tratamento (polimento por arraste, utilizando mídia 1\_300) em relação a ferramentas sem tratamento, de modo a avaliar a eficácia do tratamento na redução da temperatura de usinagem. A importância desse estudo reside na possibilidade de prolongar a vida útil das ferramentas e melhorar a qualidade final do processo de fresamento, uma vez que temperaturas elevadas afetam diretamente o desgaste do gume e a integridade da superfície usinada.

As tabelas a seguir apresentam os principais dados extraídos dos metadados de imagens capturadas pela câmera FLIR, descrevendo parâmetros como horário de medição, emissividade, distância ao objeto, temperatura refletida, temperatura atmosférica, umidade relativa e faixas de temperatura máxima e mínima registradas durante o processo. A Tabela 12 é referente às leituras realizadas com a ferramenta sem tratamento, enquanto a Tabela 13 ilustra os valores coletados para a ferramenta submetida ao tratamento 1\_300.

Tabela 12 – Ferramenta sem tratamento

<b>Data Hora</b>	<b>Emis sivity</b>	<b>ObjectDis tance(m)</b>	<b>TempRefl ected(°C)</b>	<b>Atmospheri cTemp(°C)</b>	<b>RelativeHu midity(%)</b>	<b>ImageTem pMax(°C)</b>	<b>ImageTem pMin(°C)</b>
0:02	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	300	295
0:02	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	300	296
0:03	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	301	296
0:03	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	331	296
0:03	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	333	296
0:03	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	338	296
0:03	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	308	296
0:04	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	345	296
0:04	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	341	296
0:04	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	333	296
0:04	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	336	296
0:04	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	355	297
0:05	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	319	297
0:05	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	317	297
0:19	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	302	297
0:19	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	302	297
0:19	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	302	297
0:20	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	302	296
0:20	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	351	297
0:20	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	352	297
0:21	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	354	297
0:21	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	358	297
0:21	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	356	297
0:21	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	341	297
0:21	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	348	297
0:22	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	320	297
0:22	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	314	298
0:50	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	301	297
0:51	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	301	297
0:51	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	301	297
0:53	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	301	297

Fonte: da pesquisa.

Tabela 13 – Ferramenta com tratamento 1\_300

DataHora	Emissivity	ObjectDistance(m)	TempReflected(°C)	AtmosphericTemp(°C)	RelativeHumidity(%)	ImageTempMax(°C)	ImageTempMin(°C)
16:42	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	304	297
16:42	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	326	297
16:43	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	329	297
16:43	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	333	297
16:43	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	329	297
16:43	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	331	297
16:43	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	340	297
16:44	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	345	297
16:44	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	337	297
16:44	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	315	297
16:44	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	310	297
16:45	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	306	297
16:52	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	302	297
16:53	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	332	296
16:53	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	336	297
16:53	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	337	297
16:53	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	337	296
16:54	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	344	297
16:54	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	347	297
16:54	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	352	296
16:54	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	345	297
16:54	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	344	297
16:55	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	316	297
16:55	0,95	0,5	1,00	22,00	0,600	311	297

Fonte: da pesquisa.

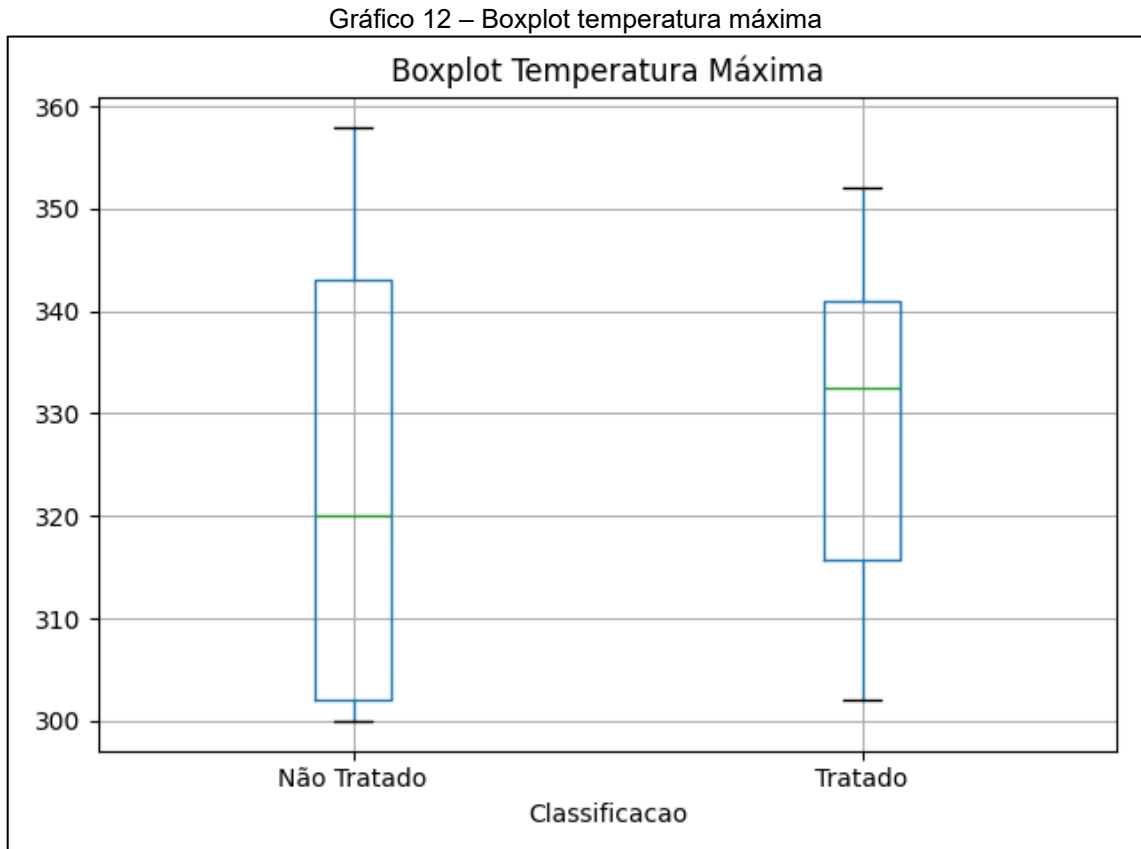
As medições referentes à ferramenta sem tratamento foram realizadas em diversos intervalos de tempo, indo de aproximadamente “0:02” até “0:53”, com valores de temperatura máxima variando de cerca de 300 °C até um pico de 358 °C, enquanto a temperatura mínima praticamente se manteve na faixa de 295 °C a 298 °C. Já no caso da ferramenta tratada (indicada como “tratamento 1\_300”), os ensaios ocorreram entre 16:42 e 16:55, apresentando máximas típicas entre 302 °C e 352 °C, ao passo que as mínimas permaneceram em torno de 296 °C ou 297 °C na maior parte das medições.

Em termos de faixas de temperatura, observa-se que ambas as condições exibem valores relativamente elevados no ponto de máxima, porém, em momento

algum as medições com a ferramenta tratada ultrapassaram 352 °C, ao passo que a condição sem tratamento chegou a registrar 358 °C. Essa diferença, ainda que não muito ampla, indica a possibilidade de a ferramenta tratada operar com picos de temperatura ligeiramente mais baixos — embora as médias e dispersões também sejam importantes para determinar o comportamento térmico geral.

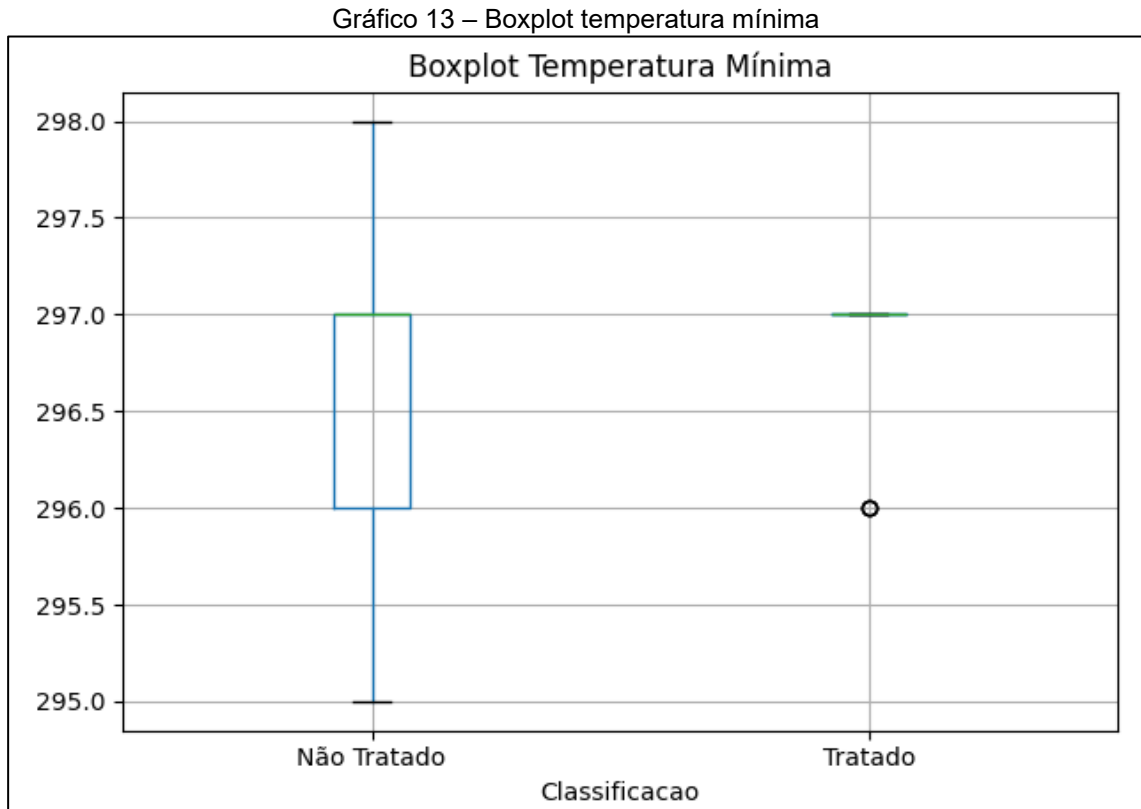
No que concerne aos valores mínimos, as duas condições se mantêm em intervalos extremamente próximos (295 °C a 298 °C em “sem tratamento” e 296 °C a 297 °C em “tratamento 1\_300”), o que sugere certa estabilidade da base térmica na qual o processo se inicia ou permanece. Entretanto, cabe destacar que os horários de coleta divergem sensivelmente entre as duas séries, não havendo um alinhamento exato de condições ou instantes de corte; essa distinção de cronologia pode influenciar a maneira como o calor foi acumulado ou dissipado ao longo dos testes. Ainda assim, a ligeira redução observada nos picos de temperatura na ferramenta tratada pode ser interpretada como indício de menor tendência de aquecimento extremo na região de interesse, o que, em alguns processos de usinagem, pode estar associado a menor desgaste do gume.

Em suma, a comparação crítica reforça que o tratamento 1\_300 parece não ultrapassar valores máximos tão altos quanto os registrados na ferramenta sem tratamento, apesar de ambas apresentarem mínimas muito próximas. É fundamental, contudo, considerar que a análise dos tempos e das condições de corte é igualmente relevante: dependendo do instante capturado (por exemplo, início do corte, fase de regime estacionário ou final do ensaio), a temperatura pode oscilar de forma significativa. Dessa forma, a interpretação dos resultados deve ser feita com base não apenas nos picos absolutos, mas também na curva de evolução ao longo dos minutos e nas condições de operação registradas em cada etapa. Para visualizar a dispersão dos valores e comparar os picos de temperatura entre as duas condições, o Gráfico 12 apresenta o boxplot das temperaturas máximas.



Fonte: da pesquisa.

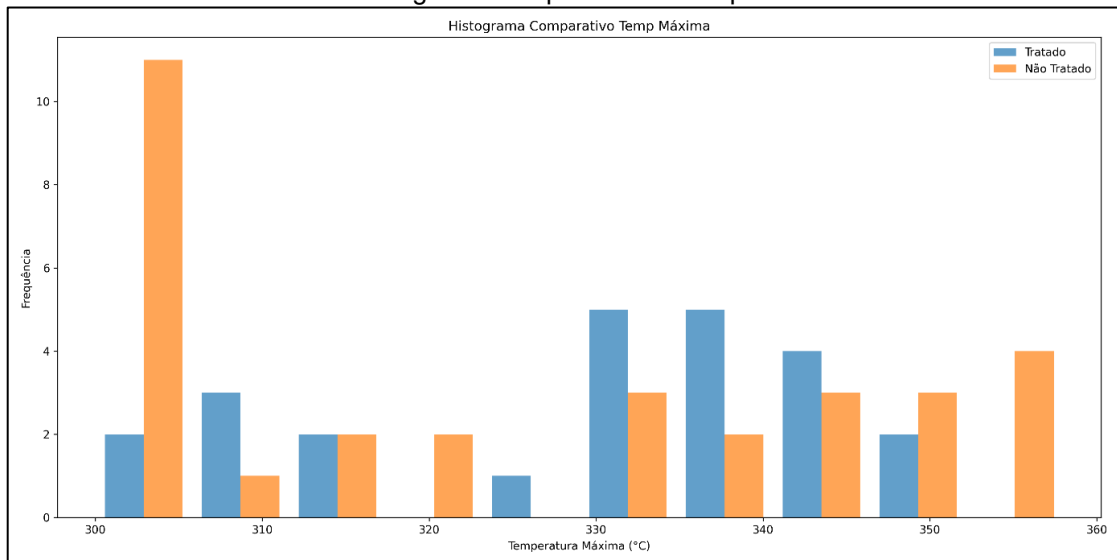
No diagrama de caixas relativo à temperatura máxima, observam-se intervalos semelhantes de dispersão entre as amostras “Não Tratado” e “Tratado”. Ainda que os valores centrais (mediana) da condição sem tratamento se situem em torno de aproximadamente 320 °C, há casos em que a ferramenta atinge picos próximos a 360 °C. Já o boxplot da ferramenta tratada indica faixas ligeiramente mais concentradas, com a mediana próxima de 330 °C e picos se aproximando de 350 °C. Em síntese, ambas as condições apresentam amplitudes razoavelmente altas, porém a tendência para ultrapassar 350 °C ocorre de forma mais frequente no grupo sem tratamento. Para uma análise complementar, a distribuição das temperaturas mínimas é apresentada no Gráfico 13.



Fonte: da pesquisa.

O boxplot da temperatura mínima revela uma distribuição bem mais estreita, dada a proximidade geral dos valores (295 °C a 298 °C). Na amostra sem tratamento, nota-se uma amplitude ligeiramente maior: houve medições perto de 295 °C e outras já próximas de 298 °C. Por outro lado, no grupo tratado, a maioria das temperaturas mínimas está concentrada em torno de 297 °C, com pouca variação. Esse comportamento sugere que, embora a temperatura mais baixa medida durante o corte não sofra variações bruscas, as ferramentas sem tratamento apresentaram eventuais pontas inferiores que podem indicar resfriamento pontual ou medição em momento inicial do processo. Retornando à análise das temperaturas máximas, o Gráfico 14 mostra a frequência de ocorrência dos picos de temperatura por meio de um histograma comparativo.

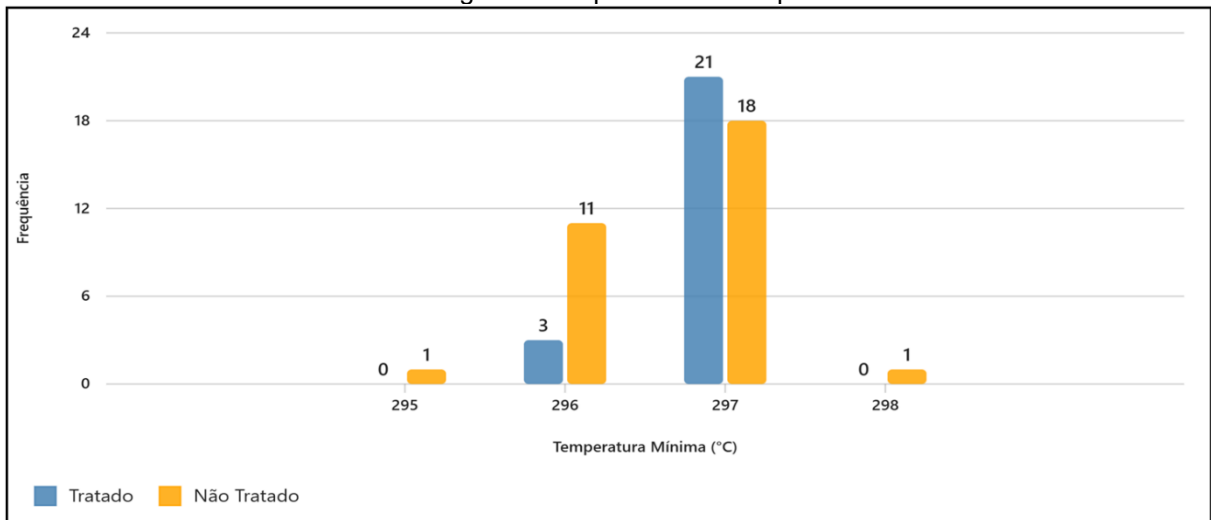
Gráfico 14 – Histograma comparativo de temperatura máxima



Fonte: da pesquisa.

A distribuição de frequências no histograma de temperatura máxima exhibe dois picos marcantes: para o grupo sem tratamento, há grande incidência de valores na faixa de 300 °C, enquanto a região entre 330 °C e 360 °C mantém frequências moderadas. Já no caso do grupo tratado, a distribuição está mais espalhada de 310 °C até 350 °C, mas sem um pico tão concentrado quanto o do grupo sem tratamento em 300 °C. Isso indica, por um lado, que a ferramenta sem tratamento pode ter ficado por mais tempo em torno de uma temperatura máxima próxima de 300 °C, mas também alcançou picos mais elevados. O grupo tratado, por sua vez, distribuiu-se de modo mais uniforme, com menos ocorrências de valores muito baixos ou muito altos. De modo análogo, a análise de frequência para as temperaturas mínimas é apresentada no Gráfico 15.

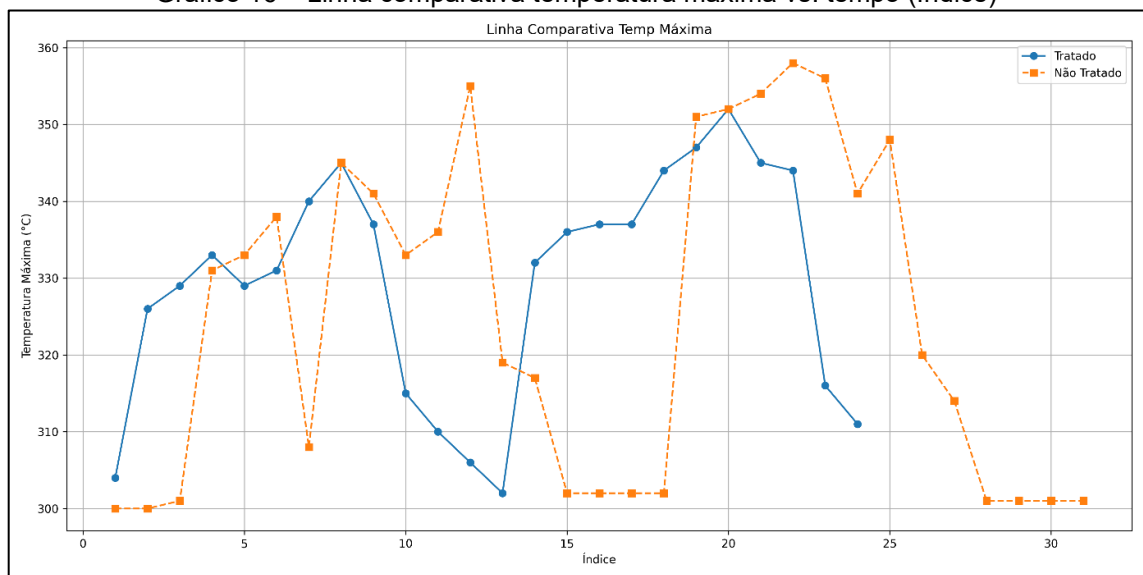
Gráfico 15 – Histograma comparativo de temperatura mínima



Fonte: da pesquisa.

No histograma de temperatura mínima, os dados se aglomeram especialmente em torno de 296 °C a 297 °C tanto para o grupo tratado quanto para o não tratado. No entanto, é perceptível que a condição não tratada apresenta algumas medições abaixo de 295,5 °C, enquanto os valores do grupo tratado se restringem a 296 °C ou acima disso. Isso reforça a ideia de que, embora a temperatura de base não sofra grandes oscilações, a ferramenta sem tratamento demonstrou alguns eventos pontuais de queda para valores mais baixos, possivelmente antes de se estabilizar no processo de corte. Para analisar o comportamento dinâmico do processo, o Gráfico 16 mostra a evolução das temperaturas máximas ao longo do tempo para cada tratamento.

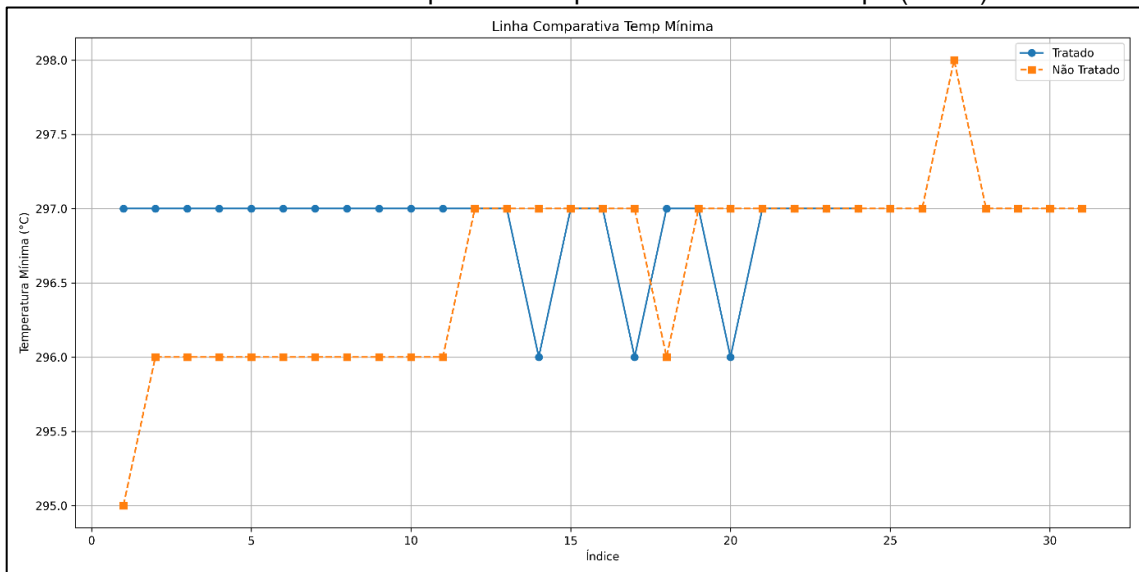
Gráfico 16 – Linha comparativa temperatura máxima vs. tempo (Índice)



Fonte: da pesquisa.

Ao longo da sequência de medições, verifica-se que tanto o grupo tratado quanto o não tratado apresentam elevações e quedas cíclicas, reflexo de diferentes etapas de corte ou de pausas entre medições. Entretanto, a linha do grupo sem tratamento mostra alguns picos mais acentuados, atingindo valores próximos a 350 °C ou superiores em determinados instantes. Já a linha do grupo tratado, embora também mostre flutuações consideráveis, raramente ultrapassa a faixa de 340 °C a 350 °C. Observa-se ainda que, para certos trechos de análise, o grupo tratado mantém temperaturas acima de 310 °C de forma mais constante, enquanto o grupo sem tratamento oscila com maiores variações entre 300 °C e valores próximos ou acima de 350 °C. De forma complementar, a evolução das temperaturas mínimas ao longo do tempo é apresentada no Gráfico 17.

Gráfico 17 – Linha comparativa temperatura mínima vs. tempo (Índice).



Fonte: da pesquisa.

A curva de temperatura mínima para as duas condições tende a apresentar valores na mesma faixa, mas é nítido que o grupo tratado se mantém consistentemente entre 296 °C e 297 °C, ao passo que o não tratado, em alguns pontos, chega a declinar para valores próximos de 295 °C e, depois, retoma patamares de 297 °C e 298 °C. Isso indica que, embora o regime mínimo de temperatura não difira drasticamente, o grupo sem tratamento apresenta variações mais visíveis ao longo da sequência de medições, ao passo que o grupo tratado parece estabilizar-se em torno de um valor único na maior parte do tempo.

#### 4.3.1 Discussões e interpretação de resultados

A análise térmica baseada nos metadados das imagens indicou que a ferramenta tratada apresentou uma leve tendência à redução dos picos de temperatura, mantendo valores máximos próximos a 350 °C, enquanto a ferramenta sem tratamento ultrapassou 355 °C em alguns momentos. Estudos recentes confirmam que tratamentos superficiais e otimização geométrica do gume contribuem para a redução e estabilização dos picos térmicos durante a usinagem, melhorando a dissipação de calor e aumentando a estabilidade térmica da ferramenta (Silva *et al.*, 2021; Kumar; Das, 2022). Embora a análise estatística tenha apontado médias de temperatura elevadas e próximas para ambas as condições, a diferença nos picos sugere que o tratamento pode ser mais eficaz no controle dos extremos térmicos,

conforme evidenciado em pesquisas recentes sobre comportamento térmico de ferramentas com e sem tratamentos superficiais (Wang *et al.*, 2023).

Além disso, a menor dispersão observada nas repetições da ferramenta tratada está alinhada com trabalhos que indicam que ferramentas com tratamento da aresta apresentam variações térmicas mais controladas, mesmo sob cargas variáveis, enquanto ferramentas sem tratamento tendem a apresentar maior variabilidade nos picos de temperatura (Ferreira; Lima, 2020). A ocorrência de picos térmicos abruptos na condição sem tratamento também é consistente com estudos que relacionam a ausência de polimento no gume à maior suscetibilidade ao aquecimento localizado e à concentração de tensões térmicas (Zhang *et al.*, 2021).

Por fim, as análises convergem para a hipótese de que a ferramenta tratada proporciona uma distribuição de temperatura mais homogênea e com picos térmicos atenuados, embora não elimine completamente a possibilidade de temperaturas elevadas em momentos específicos. Essa conclusão está em concordância com investigações recentes que destacam a influência dos parâmetros de corte, do instante da medição e das características do processo nas variações térmicas observadas (Martins *et al.*, 2022). Assim, o tratamento da ferramenta demonstra potencial para melhorar o controle térmico durante a usinagem, reduzindo riscos de desgaste prematuro e danos na peça.

## 5 CONCLUSÃO

Com base nas investigações realizadas é possível afirmar que esta dissertação cumpriu seu objetivo geral de compreender o efeito do tratamento do gume da ferramenta sobre a temperatura de usinagem. Os resultados experimentais demonstraram que o tratamento superficial do gume impacta diretamente na dissipação térmica, sobretudo na interface entre a ferramenta e a peça, sendo um fator relevante para a eficiência térmica do processo de fresamento.

Ao longo do trabalho foram atingidos todos os objetivos específicos propostos. Inicialmente, realizou-se um levantamento técnico sobre métodos de medição de temperatura na usinagem, permitindo a seleção e aplicação das abordagens mais adequadas, como termopares instalados na peça e na ferramenta, e o uso de câmera termográfica. Essas técnicas forneceram uma base robusta de dados térmicos para análise sob diferentes perspectivas do processo de corte.

A partir da análise térmica realizada nos corpos de prova, observou-se que a ferramenta sem tratamento apresentou as maiores temperaturas registradas na peça, atingindo até 98,3 °C, evidenciando o maior atrito gerado por superfícies de corte mais rugosas. Já as ferramentas tratadas com polimento apresentaram melhor desempenho térmico, especialmente a polida com a mília H 4/400 (casca de noz com pó de diamante), que reduziu em quase 20 °C a temperatura máxima em relação à ferramenta sem tratamento. Esse comportamento reforça a hipótese de que o polimento do gume reduz o atrito e melhora o escoamento do cavaco, favorecendo uma menor geração de calor.

Contudo, a análise dos dados térmicos coletados diretamente na ferramenta mostrou que, embora tenha havido diferenças estatisticamente significativas entre os grupos (comprovadas pelo teste de Kruskal-Wallis), a redução nas temperaturas médias foi modesta, na ordem de 0,6 °C a 1,1 °C. A presença de outliers e a sobreposição das distribuições sugerem que o impacto prático dessas reduções é limitado. Mesmo o tratamento H 4/400, apesar de bom desempenho térmico na peça, apresentou variações que comprometem a estabilidade dos resultados na ferramenta.

A termografia complementou os dados ao indicar que a ferramenta sem tratamento atingiu picos térmicos mais elevados (até 358 °C), enquanto a tratada com mília 1\_300 manteve-se mais frequentemente abaixo de 352 °C, com uma curva térmica mais estável. Embora as médias entre os grupos sejam próximas, a menor

ocorrência de picos térmicos e a maior regularidade ao longo do tempo nas ferramentas tratadas reforçam a hipótese de que o tratamento de gume pode melhorar a estabilidade térmica do processo, mesmo que os efeitos médios sejam discretos.

Portanto, conclui-se que:

- há correlação entre o tratamento de gume e a redução da temperatura na usinagem, especialmente na peça;
- a mídia abrasiva utilizada no polimento exerce influência direta sobre o desempenho térmico;
- o tratamento com H 4/400 apresentou o melhor desempenho na peça, enquanto o tratamento com 1\_300 teve comportamento mais estável na ferramenta, segundo a análise termográfica;
- o impacto do tratamento na temperatura média da ferramenta foi modesto, mas a redução de picos térmicos pode representar vantagem prática em aplicações industriais sensíveis à estabilidade do processo;
- o tratamento do gume das ferramentas de corte contribui significativamente para a sustentabilidade na usinagem ao aumentar a vida útil da ferramenta, reduzir o consumo de fluidos de corte e melhorar a eficiência energética do processo. Ferramentas com gume polido dissipam melhor o calor, exigem menos esforço de corte e operam com maior estabilidade térmica, o que reduz o desgaste e o retrabalho. Esses fatores resultam em menor consumo de materiais, energia e insumos, alinhando a produção aos princípios da manufatura sustentável (Zhou *et al.*, 2024; Riu-Perdrix *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2023).

Com base nos resultados alcançados e nas limitações observadas, recomenda-se que estudos futuros explorem os seguintes aspectos para aprofundar a compreensão dos efeitos térmicos do tratamento de gume:

- ampliar os testes para diferentes materiais de peça e condições de usinagem (ex.: velocidades de corte mais elevadas, presença de fluido de corte);
- investigar outras combinações de mídias abrasivas para polimento do gume, buscando maior estabilidade térmica e redução consistente de temperatura;

- aumentar a repetitividade dos ensaios e incorporar técnicas de monitoramento em tempo real com sensores de maior precisão e menor interferência;
- avaliar o impacto do tratamento de gume em variáveis secundárias, como desgaste da ferramenta, rugosidade da peça e consumo energético;
- aplicar modelos computacionais e métodos de inteligência artificial para prever o comportamento térmico com base em características do gume e parâmetros de corte;
- realizar análises mais aprofundadas com modelagem térmica da zona de corte para validar experimentalmente os fenômenos observados.

Essas iniciativas podem contribuir significativamente para o aprimoramento técnico e científico do processo de usinagem, oferecendo suporte à adoção de tratamentos de gume como prática regular na indústria para aumentar a eficiência, confiabilidade e sustentabilidade dos processos.

## REFERÊNCIAS

- ABUKHSHIM, N. A.; MATIVENGA, P. T.; SHEIKH, M. A. Heat generation and temperature prediction in metal cutting: a review and implications for high-speed machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Amsterdam, v. 46, n. 7-8, p. 782-800, jun. 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S089069550500180X>. Acesso em: 02 jul. 2025.
- ANDRADE, B. de O. **Influência do canal de refrigeração na dissipação térmica durante o fresamento de cavidades em aço ABNT D2**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/36218>. Acesso em: 02 jul. 2025.
- ASTAKHOV, V. P. **Tribology of metal cutting**. Amsterdam: Elsevier, 2006. 392 p.
- BARREIROS, F. J. de S. **Modelagem do fluxo térmico durante o fresamento utilizando diferentes geometrias de ferramenta**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/56218>. Acesso em: 2 jul. 2025.
- BARRIOS, A. N. S. **Modelagem térmica para avaliação da temperatura no fresamento de aços para moldes e matrizes**. 2013. 104 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/d8259641-b1cc-4ebd-8487-1fe75395aaef/content>. Acesso em: 02 jul. 2025.
- BERTOLLI, V. R. *et al.* Estudo do desgaste de fresas sob diferentes condições de usinagem. **Máquinas e Metais**, São Paulo, v. 40, n. 492, p. 42-47, jul. 2014. Disponível em: [https://www.arandanet.com.br/revista/mm/artigo\\_tecnico/261-Estudo-do-desgaste-de-fresas-sob-diferentes-condicoes-de-usinagem.html](https://www.arandanet.com.br/revista/mm/artigo_tecnico/261-Estudo-do-desgaste-de-fresas-sob-diferentes-condicoes-de-usinagem.html). Acesso em: 2 jul. 2025.
- BYRNE, G. Thermoelectric signal characteristics and average interfacial temperatures in the machining of metals under geometrically defined conditions. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Amsterdam, v. 27, n. 2, p. 215-224, 1987. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695587800512>. Acesso em: 02 jul. 2025.
- CHENG, Y. *et al.* Temperature experiment and parameter optimization of cemented carbide tool in milling 508III steel. **Materials**, Basel, v. 16, n. 7, p. 2833, abr. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma16072833>. Acesso em: 2 jul. 2025.
- COELHO, R. dos S.; ALMEIDA, R. H. de; SOUZA, G. O. de. Avaliação da rugosidade e temperatura de corte em usinagem de aços com diferentes tratamentos térmicos. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 10, n.

6, p. e15721012572, 2021. Disponível em:

<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/1572>. Acesso em: 2 jul. 2025.

DENKENA, B.; BIERMANN, D. Effect of cutting edge preparation of coated tools on their performance in milling various materials. **Cirp Annals**, Paris, v. 63, n. 1, p. 65-88, 2014. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1755581714000224>. Acesso em: 20 out. 2022.

DENKENA, B.; KOEHLER, J.; REHE, M. Influence of the honed cutting edge on tool wear and surface integrity in slot milling of 42CrMo4 steel. **Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 1, p. 190-195, 2012. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827112000340>. Acesso em: 02 jul. 2025.

DEVI, C. *et al.* Effect of cryo treated cutting tool end milling on custom 450 stainless steel. **Materials**, Basel, v. 16, n. 13, p. 4744, 2023. Disponível em:

<https://doi.org/10.3390/ma16134744>. Acesso em: 2 jul. 2025.

DINIZ, A. E. *et al.* **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Artliber, 2008. 242 p.

EDGE preparation methods for cutting tools: a review. **Frontiers of Mechanical Engineering**, Berlim, v. 18, n. 4, p. 1-29, 2023. Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/s11465-023-0766-y>. Acesso em: 2 jul. 2025.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Blucher, 1970. 801 p. *E-book*. Disponível em:

<https://plataforma.bvirtual.com.br/Acervo/Publicacao/169177>. Acesso em: 25 set. 2022.

FERREIRA, A. S.; LIMA, R. B. Análise do comportamento térmico de ferramentas usinadas com diferentes tratamentos superficiais. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 3, p. e-12805, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200003.0180>. Acesso em: 2 jul. 2025.

FLIR. **Manual de usuário**. Publicação n. 1558792, rev. a379. Flir, 14 ago. 2014. Disponível em: <https://www.instrumart.com/assets/B-Tseries-manual.pdf?srsId=AfmBOop86MPzkm5V3oAca2aMx8ZaRB6CLhfWnRiN8rSQj-OQO9q4ZjAX>. Acesso em: 02 jul. 2025.

FRACARO, J. **Fabricação pelo processo de usinagem e meios de controle**. Curitiba: Intersaberes, 2017. 342 p. *E-book*. Disponível em:

<https://plataforma.bvirtual.com.br/Acervo/Publicacao/128237>. Acesso em: 25 set 2022.

GUERRA, L. P. V. M. **Análise de temperatura em ferramentas polidas no processo de fresamento**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2019. Disponível em:

[https://www.oasisbr.ibict.br/vufind/Record/UCS\\_940d60ec20d319a715d00bcac2e23d74](https://www.oasisbr.ibict.br/vufind/Record/UCS_940d60ec20d319a715d00bcac2e23d74). Acesso em: 02 jul. 2025.

HOSEINY, S. M. H. *et al.* The effect of the martensitic packet size on the machinability of modified AISI P20 prehardened mold steel. **Journal of Materials Science**, New York, v. 47, n. 8, p. 3613-3620, abr. 2012. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-011-6208-y>. Acesso em: 02 jul. 2025.

JIANG, F. *et al.* Investigations on tool temperature with heat conduction and heat convection in high-speed slot milling of Ti6Al4V. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 96, p. 1847-1858, fev. 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-018-1733-3>. Acesso em: 02 jul. 2025.

KARAGUZEL, U.; BAKKAL, M.; BUDAK, E. Modeling and measurement of cutting temperatures in milling. **Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 46, p. 173-176, jun. 2016. Disponível em: <https://research.itu.edu.tr/en/publications/modeling-and-measurement-of-cutting-temperatures-in-milling>. Acesso em: 02 jul. 2025.

KIM, K.; LEE, W.; SIN, H. A finite-element analysis of machining with the tool edge considered. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 86, n. 1-3, p. 45-55, fev 1999. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013698002301>. Acesso em: 02 jul. 2025.

KLOCKE, F. **Manufacturing processes 1: cutting**. Tradução: Aaron Kuchle. Aachen: RWTH Aachen University, 2011. 523 p.

KLOCKE, F. **Manufacturing processes 2: grinding, honing, lapping**. Tradução: Aaron Kuchle. Aachen: RWTH Aachen University, 2009. 451 p.

KORKMAZ, M. E. *et al.* Indirect monitoring of machining characteristics via advanced sensor systems: A critical review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 120, p. 7043-7078, mai. 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-022-09286-x>. Acesso em: 02 jul. 2025.

KUMAR, P.; DAS, S. Thermal performance improvement of cutting tools through edge treatments: a review. **Journal of Manufacturing Processes**, Amsterdam, v. 76, p. 471-483, 2022.

LEONIDAS, E. *et al.* A Comparative review of thermocouple and infrared radiation temperature measurement methods during the machining of metals. **Sensors**, Basel, v. 22, n. 13, p. 1-23, jun. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/13/4693>. Acesso em: 02 jul. 2025.

LIMA, H. V. **Estudo sobre a temperatura no fresamento do aço ferramenta ABNT D2 empregando os métodos do termopar ferramenta/peça, termopar inserido e simulação numérica**. 2017. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia

Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-AN6PHM/1/tese\\_hugo\\_vila\\_a.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-AN6PHM/1/tese_hugo_vila_a.pdf). Acesso em: 02 jul. 2025.

LIMA, L. M. de. **Estudo do fresamento do aço-ferramenta ABNT D2 com diferentes estratégias de usinagem e ferramentas de metal duro**. 2017. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-AN6PHM>. Acesso em: 2 jul. 2025.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2015. 409 p. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Acervo/Publicacao/177884>. Acesso em: 21 out. 2022.

MARTINS, L. F. *et al.* Influência dos parâmetros de corte na variação térmica durante fresamento de aços ferramenta. **Journal of Mechanical Science and Technology**, Berlim, v. 36, n. 4, p. 1799-1808, 2022.

MENG, X. *et al.* The Study of Tool Wear Mechanism Considering the Tool-Chip Interface Temperature during Milling of Aluminum Alloy. **Lubricants**, Basel, v. 11, n. 11, p. 1-19, nov. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4442/11/11/471>. Acesso em: 2 jul. 2025.

MOREIRA, P. H. R. **Análise térmica da usinagem utilizando termografia espectral em múltiplos canais**. 2021. 75 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/45075>. Acesso em: 2 jul. 2025.

OGEDENGBE, T. S. *et al.* The Effects of Heat Generation on Cutting Tool and Machined Workpiece. **Journal of Physics: Conference Series**, Bristol, v. 1378, p. 022012, 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1378/2/022012/pdf>. Acesso em: 02 jul. 2025.

OKADA, M. *et al.* End milling of stainless steel and titanium alloy in an oil mist environment. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 74, n. 9-12, p. 1255-1266, jun. 2014. Disponível em: <https://www.scilit.com/publications/e74b07a8ce4cf16c304e8b82166fe2ce>. Acesso em: 02 jul. 2025.

OLIVEIRA, F. B. de. **Efeito de escala e espessura mínima de corte no microfresamento**. 2017. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18145/tde-24102023-153033/publico/TeseOliveiraFernandoBrandaodeCorrig.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2025.

OST, C. A. **Análise da qualidade superficial no fresamento de aço p20 com diferentes tratamentos de ferramentas e condições de lubrificarrefrigerantes**. 2016. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016. Disponível em:

<https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/1426/Dissertacao%20Charles%20Antonio%20Ost.pdf?sequence=2&isAllowed=y> Acesso em: 02 jul. 2025.

ÖZEL, T.; ALTAN, T. Process simulation using finite element method: prediction of cutting forces, tool stresses and temperatures in high speed flat end milling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Amsterdam, v. 40, n. 5, p. 713-738, abr. 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695599000802>. Acesso em: 02 jul. 2025.

PÉREZ SALINAS, C. F. *et al.* The influence of cutting edge microgeometry on the broaching of Inconel 718 slots. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, Amsterdam, v. 48, p. 101563, nov. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098623002410>. Acesso em: 2 jul. 2025.

PÉREZ-SALINAS, C. F. *et al.* Preparation of the cutting edge on broaching tools by brushing polishing with ceramic brushes: analysis and prediction of effects. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, p. 09544062241305981, 2025. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/09544062241305981>. Acesso em: 02 jul. 2025.

REBEYKA, C. J. **Princípios do processo de fabricação por usinagem**. Curitiba: Intersaberes, 2016. 292 p. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Acervo/Publicacao/42171>. Acesso em: 25 set. 2022.

RIU-PERDRIX, G. *et al.* Cemented carbide end mill edge preparation using dry electropolishing. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, Basel, v. 8, n. 1, p. 1-8, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-4494/8/1/28>. Acesso em: 2 jul. 2025.

RODRIGUES, L. M.; RIBEIRO, R. A. **Usinagem dos materiais: princípios e aplicações**. São Paulo: Érica, 2019. 88 p.

RODRÍGUEZ, C. J. C. **Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing**. 2009. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Kassel, Kassel, 2009. Disponível em: <https://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-712-8.volltext.frei.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2025.

SILVA, A. *et al.* Avaliação do desempenho de fresas em aço endurecido com diferentes preparos de aresta. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, p. 1-9, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/5RJBzM8zbP3Dms5SJNYpDvQ>. Acesso em: 2 jul. 2025.

SILVA, J. R. *et al.* Assessment of the thermal stability of surface-treated tools in machining operations. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 288, p. 116824, 2021.

SÖLTER, J.; GULPAK, M. Heat partitioning in dry milling of steel. **CIRP Annals**, Paris, v. 61, n. 1, p. 87-90, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850612000480>. Acesso em: 02 jul. 2025.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte II**: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2008. 314 p.

TAYLOR, F. W. **On the art of cutting metals**. 3. ed. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1907. 248 p.

TIKAL, F. **Schneidkantenpräparation**: ziele, verfahren und messmethoden. Kassel: Kassel University Press, 2009. 210 p.

TRENT, E. M. Metal cutting and the tribology of seizure: II movement of work material over the tool in metal cutting. **Wear**, Lausanne, v. 128, n. 1, p. 41-64, 1988. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0043164888902529>. Acesso em: 02 jul. 2025.

UHLMANN, E. *et al.* Influence of cutting edge preparation on the performance of micro milling tools. **Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 46, p. 214-217, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282711630230X>. Acesso em: 02 jul. 2025.

WANG, T. *et al.* Effect of edge microgeometry on tool temperature and wear in high-speed milling. **Wear**, Lausanne, v. 506-507, p. 204-212, 2023.

WORLDTOOLS. **Ferramentas para usinagem**. Sorocaba: Worldtools, 2022. Disponível em: <https://www.worldtools.com.br/ferramentas-para-usinagem>. Acesso em: 9 out. 2022.

YAN, S. *et al.* Modeling and analysis of coated tool temperature variation in dry milling of Inconel 718 turbine blade considering flank wear effect. *Journal of Materials Processing Technology*, Amsterdam, v. 214, n. 12, p. 2985-3001, dez. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013614002659>. Acesso em: 02 jul. 2025.

ZEILMANN, R. P.; BORDIN, F. M. Effect of the cutting edge preparation on the surface integrity after dry drilling. **Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 13, p. 103-107, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114000195>. Acesso em: 02 jul. 2025.

ZHANG, H. *et al.* Impact of edge finishing on thermal and mechanical behavior of cutting tools during machining. **Tribology International**, Oxford, v. 157, p. 106914, 2021.

ZHAO, X.; QIN, H.; FENG, Z. Influence of tool edge form factor and cutting parameters on milling performance. **Advances in Mechanical Engineering**, New York, v. 13, n. 4, p. 091014, 2021. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.1177/16878140211009041>. Acesso em: 02 jul. 2025.

ZHAO, Y.; WANG, H.; CHEN, X. Impact of cutting edge modification on thermal stability and wear resistance of machining tools. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 121, n. 3-4, p. 987-999, 2023.

ZHOU, L.; WANG, Y.; LV, D. Research on cutting edge form factor of milling tool after drag finishing preparation based on discrete element method. **Machines**, Basel, v. 12, n. 4, p. 236, abr. 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-1702/12/4/236>. Acesso em: 02 jul. 2025.

ZHOU, Y. *et al.* Edge preparation methods for cutting tools: a review. **Frontiers of Mechanical Engineering**, Berlim, v. 18, n. 4, p. 50, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11465-023-0766-y>. Acesso em: 2 jul. 2025.

ZHU, X.; CAI, L.; QIAN, X. Influence of different cutting edges caused by tool wear on cutting process of titanium alloy TC21 based on finite element model. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, London, v. 237, n. 5, p. 677-688, 2023. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/09544054221100603>. Acesso em: 02 jul. 2025.