

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

THIAGO BERNARDO DA SILVA

ANÁLISE TERMOGRÁFICA DO PROCESSO DE FRESAMENTO DE TOPO

CAXIAS DO SUL

2024

THIAGO BERNARDO DA SILVA

ANÁLISE TERMOGRÁFICA DO PROCESSO DE FRESAMENTO DE TOPO

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul. Área de concentração: Usinagem.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo P. Zeilmann

CAXIAS DO SUL

2024

THIAGO BERNARDO DA SILVA

ANÁLISE TERMOGRÁFICA DO PROCESSO DE FRESAMENTO DE TOPO

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade de Caxias do Sul. Área de concentração: Usinagem.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Eng^o. Rodrigo Panosso Zeilmann

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Eng^o. Alexandre Vieceli

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Eng^o. Carlos Eduardo Borsoi Rheinheimer

Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

A usinagem tem emergido como uma disciplina de grande importância estratégica dentro da indústria produtiva, que vivencia grandes transformações impulsionadas pelo rápido avanço tecnológico dos processos. Nesse contexto, o calor gerado no fresamento é um fator crítico e que requer monitoramento para entender melhor a geração e distribuição de calor, afim de otimizar as operações de corte. As altas temperaturas podem ter consequências adversas, como o desgaste prematuro da ferramenta de corte, alterações nas propriedades mecânicas da peça além do comprometimento da precisão dimensional e do acabamento superficial. Técnicas como a termografia são usadas para medir a geração e a distribuição de calor, ajudando a identificar maneiras de reduzir o aquecimento e prolongar a vida útil das ferramentas. Nesse trabalho, foi realizada uma análise termográfica do processo de fresamento de topo utilizando uma ferramenta sem tratamento superficial do gume. Após os ensaios, foram constatados desgastes da ferramenta que comprovam o aumento das temperaturas, e servem de base para uma análise dos consequentes fatores que também contribuíram para essa elevação. Além disso, demonstrou a eficiência e a capacidade da câmera termográfica em registrar o comportamento térmico, fornecendo informações precisas e validando a utilização do equipamento para futuras medições.

Palavras-chave: Usinagem; fresamento; gume; temperatura; termografia; desgaste.

ABSTRACT

Machining has emerged as a discipline of significant strategic importance within the manufacturing industry, which is undergoing major transformations driven by the rapid technological advancement of processes. In this context, heat generated during milling is a critical factor that requires monitoring to better understand heat generation and distribution, aiming to optimize cutting operations. Elevated temperatures can lead to adverse consequences such as premature tool wear, changes in mechanical properties of the workpiece, as well as compromised dimensional accuracy and surface finish. Techniques like thermography are employed to measure heat generation and distribution, aiding in identifying ways to reduce heating and extend tool life. In this work, thermographic analysis was conducted on end milling using an untreated tool. Following the tests, tool wear was observed, confirming temperature increases and providing a basis for analyzing contributing factors. Moreover, it demonstrated the efficiency and capability of thermographic cameras in capturing thermal behavior, offering precise information and validating their use for future measurements.

Keywords: Machining; milling; cutting edge; temperature measurement; thermography; wear out.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fresamento frontal e fresamento tangencial	16
Figura 2 - Fresamento concordante e fresamento discordante	17
Figura 3 - Tipos de fresas de topo	18
Figura 4 - Representação do corte e formação do cavaco	19
Figura 5 - Distribuição de temperatura no corte.....	21
Figura 6 - Zonas de geração de calor durante o corte.....	22
Figura 7 - Variação da distribuição de Energia de corte com a velocidade	23
Figura 8 - Medição de temperatura com termopar e transmissor	26
Figura 9 - Medição de temperatura com câmera térmica	28
Figura 10 - Fluxograma de atividades	30
Figura 11 - Fresa de topo utilizadas nos ensaios	31
Figura 12 - Corpo de prova.....	32
Figura 13 - Centro de usinagem	33
Figura 14 - Câmera termográfica FLIR Série T 360	34
Figura 15 - Avaliação dos gumes antes dos ensaios.....	35
Figura 16 - Avaliação dos gumes após os ensaios.....	36
Figura 17 - Posicionamento da câmera termográfica	37
Figura 18 - Resultado da gravação do visor da câmera termográfica	38
Figura 19- Gráfico de temperaturas do primeiro ensaio.....	39
Figura 20 - Máxima temperatura de cada passe do primeiro ensaio	40
Figura 21 - Gráfico de temperaturas do segundo ensaio	40
Figura 22 - Máxima temperatura de cada passe do segundo ensaio.....	41
Figura 23 - Gráfico de temperaturas do terceiro ensaio	41
Figura 24 - Máxima temperatura de cada passe do terceiro ensaio.....	42
Figura 25 - Gráfico de temperaturas do quarto ensaio	42
Figura 26 - Máxima temperatura de cada passe do quarto ensaio.....	43
Figura 27 - Gráfico de temperaturas do quinto ensaio	43
Figura 28 - Máxima temperatura de cada passe do quinto ensaio.....	44
Figura 29 - Gráfico de temperaturas dos cinco ensaios.....	45
Figura 30 - Gráfico de variação das temperaturas.....	45
Figura 31 - Distribuição da temperatura.....	47
Figura 32 - Imagem obtida da câmera termográfica FLIR T360	49

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Parâmetros de corte.	31
Quadro 1 - Vantagens e limitações dos métodos de medição de temperatura.	25

LISTA DE SIGLAS

UCS	Universidade de Caxias do Sul
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano do Ferro e do Aço)
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão de Normalização)
IR	<i>Infra-red</i> (Infravermelho)
3D	Três Dimensões
HRc	<i>Hardness Rockwell scale C</i> (Escala de dureza Rockwell C)
LWIR	<i>Long-Wavelength Infrared</i> (Infravermelho de Comprimento de Onda Longo)
SWIR	<i>Short-Wave Infrared</i> (Infravermelho de Comprimento de Onda Curto)
GUS	Grupo de Usinagem
PPGMEC	Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica

LISTA DE SÍMBOLOS

L	Comprimento [mm]
D	Diâmetro [mm]
a_p	Profundidade de corte axial [mm]
F_z	Avanço por gume [mm/rot]
n	Rotação [rpm]
a_e	Profundidade de corte lateral [mm]
V_c	Velocidade de corte [m/min]
$\varphi\%$	Umidade relativa [%]
T_{amb}	Temperatura ambiente [°C]
ϕ	Ângulo teta
ε	emissividade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA	12
1.2	AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO	13
1.3	OBJETIVO	14
1.3.1	Objetivo geral	14
1.3.2	Objetivos específicos.....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	FRESAMENTO	15
2.1.1	Fresamento de topo reto	17
2.1.2	Mecânica do corte no fresamento	19
2.1.3	Solicitações térmicas no fresamento	20
2.2	MEDIÇÃO DA TEMPERATURA NA USINAGEM	24
2.2.1	Medição de temperatura por termopares	26
2.2.2	Medição de temperatura por termografia	27
3	METODOLOGIA	29
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	29
3.2	INSTRUMENTAÇÃO	30
3.2.1	Ferramentas	30
3.2.2	Parâmetros de Usinagem	31
3.2.3	Corpo de prova	32
3.2.4	Centro de usinagem.....	32
3.2.5	Sistema de medição com câmera térmica.....	33
4	RESULTADOS.....	35
4.1	AVALIAÇÃO DA FERRAMENTA	35
4.2	MONTAGEM E AQUISIÇÃO DE DADOS DA CÂMERA TERMOGRÁFICA. ...	36
4.3	RESULTADO DAS MEDIÇÕES com a câmera termográfica	38
4.3.1	Primeiro Ensaio	38
4.3.2	Segundo ensaio.....	40
4.3.3	Terceiro Ensaio.....	41

4.3.4	Quarto ensaio	42
4.3.5	Quinto Ensaio	43
4.4	AVALIAÇÃO GERAL DAS TEMPERATURAS	44
4.4.1	Comportamento térmico durante o fresamento	47
4.5	AVALIAÇÃO DA CÂMERA TERMOGRÁFICA	48
5	CONCLUSÃO	51
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1 INTRODUÇÃO

O mercado industrial está passando por transformações significativas impulsionadas pela rápida evolução da tecnologia, mudanças nas demandas dos consumidores e busca por eficiência e alta produtividade. Atualmente, a usinagem surge como uma disciplina fundamental e estratégica para impulsionar a eficiência e inovação nos setores industriais. Essa técnica ganha ainda mais relevância diante do cenário contemporâneo e demandas por ferramentas inovadoras e processos de preparação otimizados, que garantem uma contribuição significativa para alta produtividade e para a melhoria da vida útil da ferramenta.

Para FERRARESI (1970), a influência do calor na formação e propagação durante o processo de corte de metais revela uma complexidade considerável, pois à medida que a temperatura se eleva, ocorrem transformações nas propriedades físicas e mecânicas do metal. A elevada temperatura exerce um papel determinante no desgaste das ferramentas, restringindo a viabilidade de empregar taxas de corte mais elevadas e, conseqüentemente, limitando as condições máximas de produtividade e longevidade das ferramentas.

O setor de fabricação, em particular a indústria de usinagem, tem demonstrado um forte interesse em compreender a geração e a distribuição de calor durante as operações de corte (LEONIDAS *et al.* 2022). De acordo com Abukshim *et al* (2006), a compreensão completa da usinagem de metais ainda é um desafio devido à natureza altamente não linear do processo e à complexa interação entre os campos de deformação e temperatura.

Nesse contexto, a análise da temperatura no fresamento é um campo dinâmico e essencial para avaliar, otimizar e aprimorar a usinagem. Avanços tecnológicos, como sensores de temperatura, simulações e monitoramento online, estão permitindo uma avaliação mais precisa e sofisticada da temperatura durante o processo. Isso resulta em melhorias na qualidade e eficiência da produção industrial.

1.1 JUSTIFICATIVA

Segundo (TRENT, 1988 apud MACHADO *et al.*,2015), “A maior parte da potência consumida na usinagem dos metais é convertida em calor próximo à aresta cortante da ferramenta e muitos problemas técnicos e econômicos são causados direta ou indiretamente por conta desse aquecimento.” Sendo assim, foram exploradas diversas maneiras para aprimorar o desempenho das ferramentas de corte e, conseqüentemente, reduzir essa geração de calor.

Dentre essas melhorias, o tratamento superficial do gume da ferramenta surge como uma opção que impacta diretamente na temperatura durante o processo, por exemplo. Esse tratamento visa aprimorar o desempenho, a confiabilidade da ferramenta de corte e a qualidade da peça de trabalho, o tratamento do gume consiste fundamentalmente em gerar geometrias de gume monitoradas, modificando a microtopografia, a rugosidade e textura da face e do flanco da ferramenta, nas proximidades do gume (RODRÍGUEZ, 2009).

Ainda assim, é fundamental monitorar e controlar a temperatura durante a usinagem para garantir resultados consistentes e de alta qualidade. É essencial compreender os elementos que afetam a produção de calor e a maneira como o calor se dispersa, bem como as temperaturas que se formam na ferramenta e na peça, próximo ao gume. Nos últimos 80 anos, houve um avanço gradual, porém, limitado na busca por uma compreensão precisa a respeito disso, com poucas investigações detalhadas, realizadas em casos específicos (MACHADO *et al.*, 2015).

Relacionado a isso, o presente estudo está diretamente alinhado ao projeto conduzido pelo grupo de usinagem e integrado ao Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica (PPGMEC) desta universidade. O projeto abrange a avaliação detalhada das temperaturas durante ensaios de fresamento, abordando tanto ferramentas sem tratamento, quanto aquelas com diferentes tratamentos de polimento do gume e concentra-se na análise da influência geral da temperatura no processo de usinagem. O trabalho visa contribuir significativamente para o projeto em questão, dessa forma, busca-se mensurar a geração de calor e sua distribuição ao longo da operação de fresamento de topo, utilizando uma ferramenta sem tratamento superficial de gume e adotando a termografia como método de medição.

1.2 AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO

Situada na cidade de Caxias do Sul, um importante polo industrial e cultural no estado do Rio Grande do Sul, a Universidade de Caxias do Sul (UCS) desempenha um papel fundamental na capacitação da próxima geração de líderes em diversas áreas do conhecimento. Desde sua fundação, a universidade tem sido um farol de conhecimento, atraindo estudantes de todo o Brasil e do exterior para suas diversas faculdades e programas acadêmicos.

Com uma ampla gama de cursos de graduação, pós-graduação e pesquisa, a UCS abrange desde as ciências exatas e tecnológicas até as humanidades e ciências sociais. Sua infraestrutura de ponta oferece um ambiente propício para o aprendizado interdisciplinar, estimulando a inovação e a colaboração entre alunos e professores.

O trabalho foi desenvolvido em conjunto com o Grupo de Usinagem (GUS), no Laboratório da instituição. O tema do estudo, de medição de temperatura, está ligado a um projeto de pesquisa e a uma dissertação de mestrado, do engenheiro Everton Fouchy. O laboratório é composto por um centro de usinagem, instrumentos de medição e outros equipamentos convencionais ligados às tarefas. Todo o desenvolvimento foi acompanhado pelo professor orientador e o técnico do laboratório.

1.3 OBJETIVO

Neste item, serão delineados os objetivos gerais e específicos que nortearão a realização deste estudo.

1.3.1 Objetivo geral

O propósito do presente estudo visa avaliar as temperaturas de uma ferramenta sem tratamento superficial do gume durante o processo de fresamento de topo, por meio da termografia.

1.3.2 Objetivos específicos

No contexto do objetivo principal, estão contemplados certos objetivos específicos, os quais são elencados abaixo.

- a) analisar a distribuição de temperatura ao longo da superfície da ferramenta;
- b) identificar os fatores que podem ter influenciado as variações de temperatura;
- c) comparar os resultados obtidos com trabalhos anteriores e literatura; e
- d) avaliar a câmera termográfica como meio de medição principal.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, é apresentada a fundamentação teórica que sustentará a estrutura e o desenvolvimento do presente estudo.

2.1 FRESAMENTO

O fresamento é um processo de usinagem que utiliza uma ferramenta, geralmente com múltiplos gumes, para realizar cortes longitudinais com movimento de rotação da fresa e criar superfícies diversas em uma peça. Esses cortes podem ser feitos perpendicularmente ou, ocasionalmente, de forma transversal ao eixo de rotação da ferramenta (KLOCKE, 2011).

A ação de corte é gerada pela rotação da fresa em torno de seu eixo, enquanto o movimento de deslocamento é normalmente realizado pela própria peça durante o processo de usinagem. A peça é fixada na mesa da máquina e é deslocada sob a ferramenta rotativa, que molda e dimensiona a peça de acordo com as especificações desejadas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

No fresamento, ao contrário de outros métodos como torneamento ou furação, as arestas de corte não estão constantemente envolvidas. Nesse processo, ocorre pelo menos uma pausa no contato a cada rotação da ferramenta, caracterizando o corte interrompido. Devido a essas interrupções frequentes, as condições de contato entre a ferramenta e a peça têm um papel fundamental na determinação das características de desgaste dos materiais da ferramenta de corte, além das condições de corte propriamente ditas (KLOCKE, 2011).

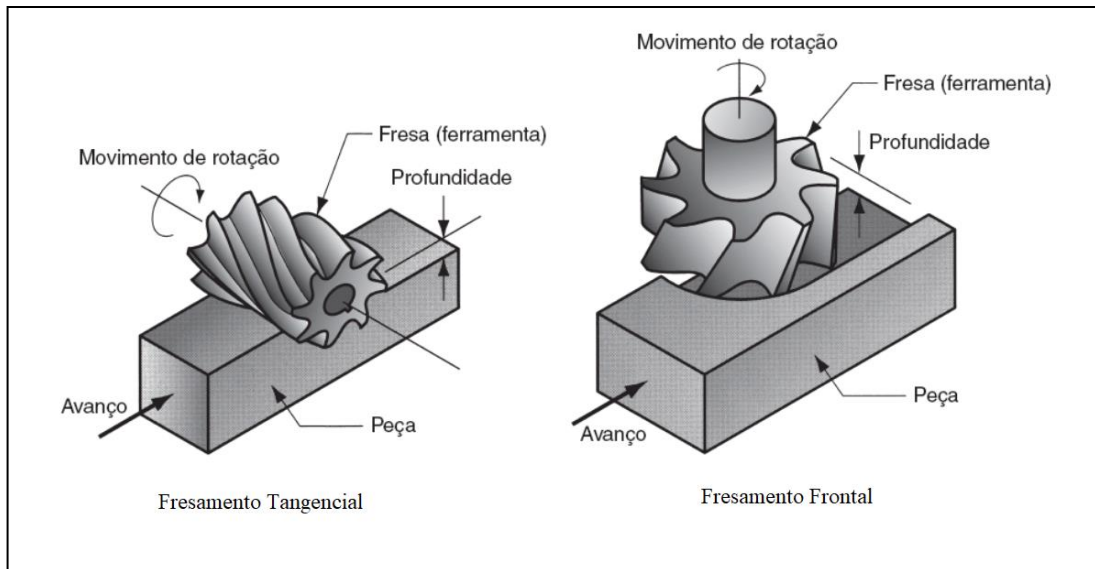
As vantagens desse método estão relacionadas à sua capacidade de produzir uma ampla variedade de formas, alcançar excelentes acabamentos superficiais, atingir altas taxas de remoção de material, resultando em alta produtividade, e à disponibilidade de diversas ferramentas que podem ser criadas ou combinadas para fabricar superfícies mais complexas. (STEMMER, 2005).

Na prática, costuma-se nomear os procedimentos de fresamento de acordo com o tipo e formato das ferramentas utilizadas, como fresamento simples, fresamento de topo, fresamento lateral e frontal, fresamento de superfície, fresamento de perfil, entre outros. Classificam-se os procedimentos de fresamento na DIN 8589-3 de acordo com a superfície produzida, o formato da ferramenta e a cinemática (KLOCKE, 2011).

O processo, conforme a disposição dos gumes da fresa, pode ser classificado em fresamento frontal e fresamento tangencial (Figura 1). No fresamento frontal, os gumes estão

situados na superfície frontal da ferramenta, geralmente em ângulo reto ao eixo da fresa, já no fresamento tangencial, também chamado de periférico, os gumes utilizados para o corte estão localizados na superfície cilíndrica da ferramenta, num plano paralelo ao eixo da fresa (STEMMER, 2005).

Figura 1- Fresamento frontal e fresamento tangencial



Fonte: Groover (2017).

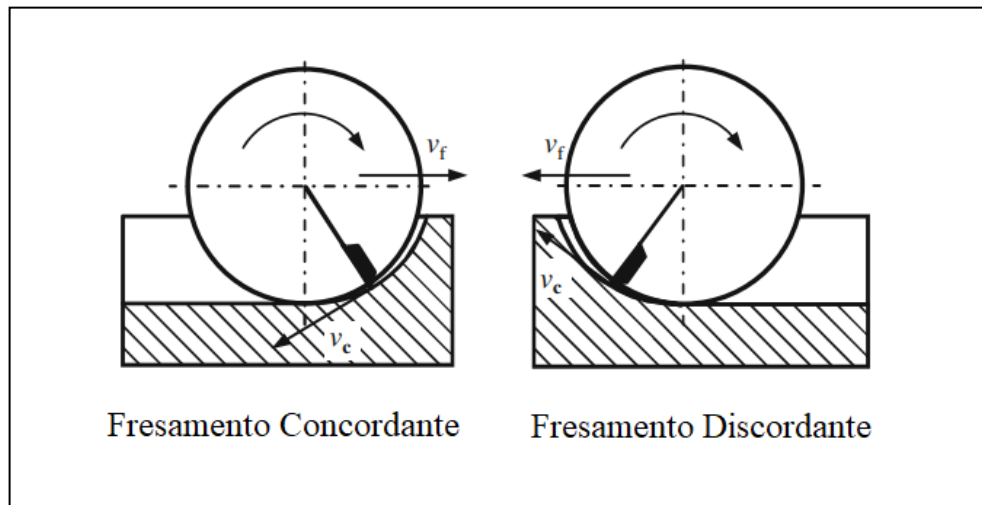
A operação pode também ser classificada dependendo da rotação da ferramenta e da direção de avanço. Quando o sentido de avanço é o mesmo do movimento de rotação da ferramenta, é denominado fresamento concordante, já quando o sentido de avanço é contrário ao sentido do movimento rotatório da fresa, é chamado de fresamento discordante (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

No fresamento discordante, a alternância da componente vertical da força de usinagem ao longo da operação resulta em vibrações indesejáveis, que impactam negativamente na qualidade superficial e na tolerância da peça fresada, diferentemente do fresamento concordante onde a componente vertical da força tem sempre o mesmo sentido (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

No fresamento discordante, o cavaco inicialmente é fino e aumenta de espessura à medida que a fresa gira, chamado "*up milling*" em inglês. No fresamento concordante (*down milling*), o cavaco começa espesso e diminui durante o corte. O comprimento do cavaco é menor no fresamento concordante, resultando em um menor tempo de contato entre o dente da fresa e

a peça para um determinado volume de material cortado e prolonga a vida útil da ferramenta (GROOVER, 2017). A Figura 2 ilustra o fresamento concordante e o discordante.

Figura 2 - Fresamento concordante e fresamento discordante



Fonte: Klocke (2011).

2.1.1 Fresamento de topo reto

O fresamento de topo é um processo amplamente utilizado e benéfico tanto para a criação de superfícies quanto para a formação de ranhuras, bolsões, fendas e cavidades de diversas dimensões e formatos (STEMMER, 2005).

Esse procedimento oferece vantagens exclusivas. Como outras ferramentas de corte, possuem diversos gumes cortantes nas pontas, entretanto há também gumes na área periférica. São ferramentas de alta precisão e proporcionalmente menores, possibilitando cortar geometrias complexas e tornando-as adequadas para uma variedade de utilizações (WAYKEN, 2022).

Quando o corte ocorre ao mesmo tempo na parte frontal e parte tangencial, as direções de corte e da hélice devem ser alinhadas já que resultam em uma força axial que busca afastar a ferramenta de seu suporte. Nesse cenário, é fundamental garantir uma fixação mais sólida, geralmente alcançada com parafusos de fixação ou cones, tanto com interferência térmica como hidráulicos. No fresamento de contornos, onde somente os gumes tangentes à ferramenta são utilizados, é necessário que as direções de corte e da hélice devem ser opostas. Isso cria uma força axial que reforça a estabilidade da fresa no cone de suporte (STEMMER, 2005).

A superfície da parte frontal da ferramenta pode ser plana ou semiesférica, o número de gumes e o diâmetro da fresa varia de acordo com alguns parâmetros como a forma da peça

final e o material da peça a ser usinada, por exemplo (STEMMER, 2005). A Figura 3 apresenta alguns tipos de fresas de topo.

Figura 3 - Tipos de fresas de topo



Fonte: Buckell (2019).

A fresa de topo reto, também conhecida como fresa de topo plano, é caracterizada por sua extremidade plana, que é perpendicular ao eixo da ferramenta e possuem forma cilíndrica. A extremidade plana da fresa permite que ela corte diretamente na superfície da peça de trabalho, resultando em cortes planos e arestas retas. As referências específicas para fresas de topo reto incluem informações sobre o tamanho, o tipo de corte, o material da ferramenta e outros detalhes, podendo variar dependendo do fabricante e das necessidades específicas de usinagem.

As fresas de topo devem ser projetadas, na maioria dos casos, com uma alta relação de comprimento-diâmetro ($L/D > 5-10$) dependendo da aplicação e das condições de fixação. Isso devido a vibrações durante o processo, o que pode levar a um maior desgaste, particularmente quando se trata de ferramentas de alta dureza (KLOCKE, 2011).

Além disso, essa vibração devido a flexão de ferramentas presente na operação afeta as dimensões e a forma das peças. Como prevenção, aprimoramentos na geometria da ferramenta e da peça, no método de fixação e no método de fresamento, bem como dos parâmetros de corte, são essenciais para garantir qualidade no processo (KLOCKE, 2011).

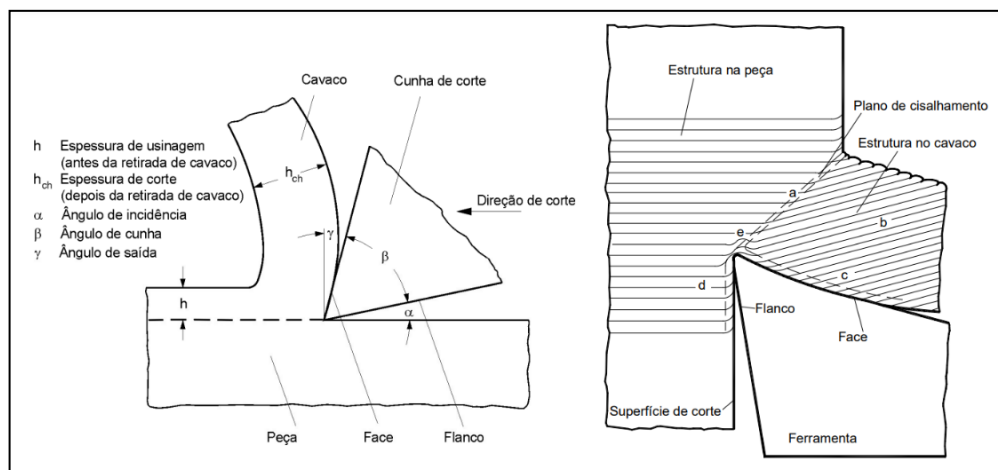
2.1.2 Mecânica do corte no fresamento

Na mecânica do corte, a ferramenta penetra na peça fazendo com que ocorra a deformação elástica e plástica do material. Quando a aresta cortante da ferramenta atinge a tensão de cisalhamento máxima, rompe o material e o resultado é a formação do cavaco. Esse cisalhamento ocorre ao longo de um plano posicionado em um ângulo ϕ em relação à superfície usinada. A maior parte da energia mecânica envolvida no processo de usinagem é consumida ao longo desse plano de cisalhamento com o cavaco deformado, que escoar sobre a face da ferramenta (GROOVER, 2017; KLOCKE, 2011).

Durante o corte, a aresta de corte da ferramenta é posicionada a certa distância abaixo da superfície original do material. Isso corresponde à espessura do material que formará o cavaco, chamado espessura de corte. Além da deformação de cisalhamento que ocorre no plano citado, há também o chamado cisalhamento secundário gerado pelo atrito entre o cavaco removido e a ferramenta, durante o escoamento (GROOVER, 2017). A figura 4 ilustra a representação do corte e a formação de cavaco.

O contexto no qual esse escoamento ocorre tem impacto direto em diversos pontos do processo como na força de usinagem, no mecanismo de formação do cavaco, na geração de calor e temperatura de corte, afetando assim, o tempo de vida da ferramenta (MACHADO *et al.*, 2015).

Figura 4 - Representação do corte e formação do cavaco



Fonte: Adaptado de Klocke (2011).

O conhecimento da força de usinagem que age sobre a cunha cortante e o estudo de suas componentes vetoriais são de grande importância, porque possibilitam estimar a potência

necessária para o corte, bem como as forças atuantes nos elementos da máquina-ferramenta (MACHADO *et al.*,2015).

Essa força, denominada de força de usinagem se desdobra em três componentes fundamentais, exercendo influência direta sobre a cunha cortante e, por extensão, sobre a integridade da máquina-ferramenta. A força de corte, a qual atua seguindo a direção de corte, é determinada pela velocidade de usinagem e responsável pela maior parte da potência de usinagem; a força de avanço segue a mesma direção e sentido que a velocidade de avanço, desempenhando um papel significativo na deformação da ferramenta; e a força passiva, caracterizada pela componente projetada perpendicular ao plano de usinagem (MACHADO *et al.*,2015).

Além das forças, o torque e a vibração também são críticos, podendo afetar a qualidade da usinagem, enquanto o desgaste da ferramenta e a temperatura gerada precisam ser monitorados para manter a eficiência e a vida útil da ferramenta. Portanto, o controle preciso dessas solicitações, juntamente com a escolha adequada de parâmetros de usinagem e ferramentas, é essencial para garantir resultados eficazes no processo de fresamento.

2.1.3 Solicitações térmicas no fresamento

A temperatura no gume de corte tem influência direta no desempenho do processo de fresamento. Elevadas temperaturas podem encurtar a vida útil da ferramenta, e até mesmo causar variações nas dimensões da peça devido à expansão térmica do material da peça. O calor gerado, resultando em dilatação térmica traz dificuldades ao buscar alcançar tolerâncias rigorosas, além de poder deteriorar a integridade superficial do material (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003; GROOVER, 2017).

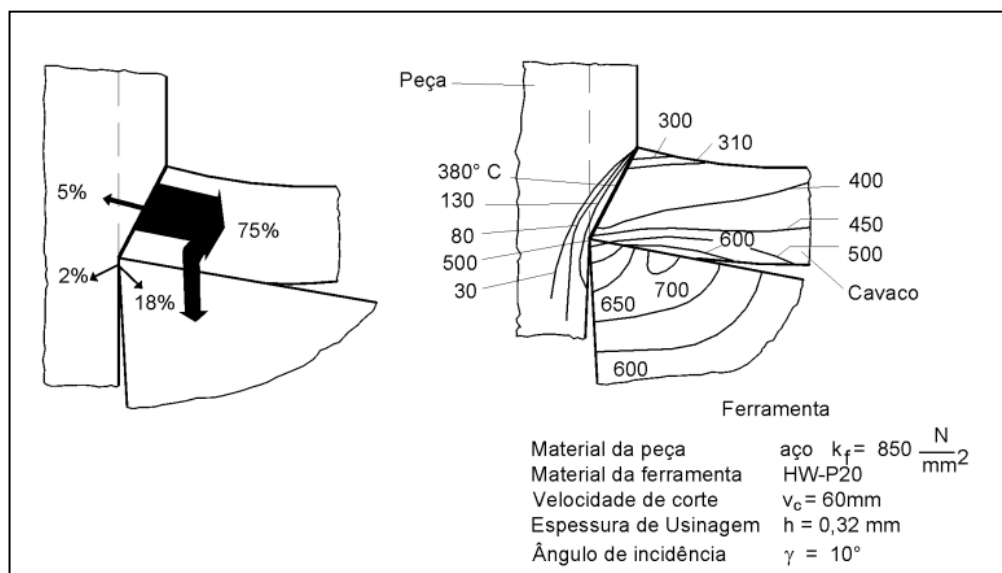
A geração de calor é uma ocorrência inevitável principalmente devido a deformação plástica do cavaco e ao atrito entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho. Segundo Klocke (2011) e Stemmer (2005), quase toda a energia mecânica empregada no processo de corte se converte em energia térmica. Isso acontece porque os pontos de calor coincidem com os pontos de deformação, tornando a zona de cisalhamento e as áreas de atrito na ferramenta as principais fontes térmicas.

A maior parte do calor é dissipada pelo cavaco e a maior parte da energia mecânica, geralmente maior que 50%, convertida na zona de cisalhamento. (KLOCKE, 2011.) As taxas do calor total gerado no processo variam conforme alguns parâmetros como o material da ferramenta e da peça, o modo de usinagem, as condições de corte e a forma da ferramenta.

Entretanto, Diniz, Marcondes e Coppini (2003), consideram, para uma abordagem inicial, que as principais origens de geração de calor estão na deformação e no plano de cisalhamento, devido ao cavaco cisalhado. Na sequência, a interação do cavaco na superfície de saída da ferramenta e entre a peça e a superfície de folga da ferramenta são considerados.

No que diz respeito à influência do material da peça, a quantidade de calor dissipada será proporcional a sua condutividade (STEMMER, 2005). A Figura 5 ilustra a distribuição de temperatura durante o corte.

Figura 5 - Distribuição de temperatura no corte



Fonte: Adaptado de Klocke (2011).

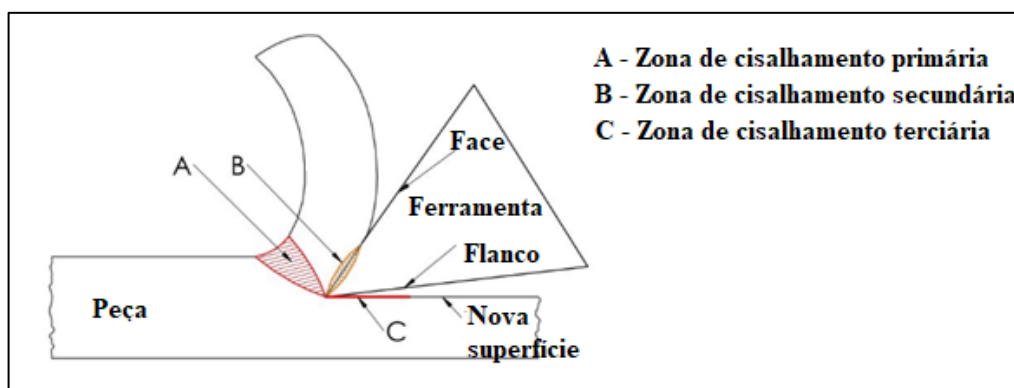
Para Klocke (2011), considerando uma partícula de material na região de corte, sua temperatura será pelo menos igual a de uma partícula na zona de cisalhamento. À medida que essa partícula migra em direção à região de contato, o material é substancialmente aquecido na base do cavaco e na face da ferramenta, devido à conversão quase total da energia requerida para vencer o atrito entre o cavaco e a face de ataque em forma de calor. A temperatura mais elevada não é indicada na aresta de corte, mas sim a uma certa distância dela, conforme as condições de usinagem.

Comparativamente, as temperaturas no flanco tendem a ser mais baixas que na face. Essa diferença, no corte com ferramentas de metal duro, é condicionada pela posição da zona de contato na face. Quanto mais próximo, mais as temperaturas se assemelham. Isso implica que as temperaturas no flanco também se elevam consideravelmente, sobretudo em operações com altas velocidades de corte e avanços pequenos. É possível encontrar temperaturas

superiores a 800°C na face de flanco em fresamento com ferramentas de metal duro, dependendo das condições escolhidas durante o processo de corte (KLOCKE, 2011).

Trent e Wright (2000) identificam as três regiões principais onde o calor é gerado durante a usinagem como zona de cisalhamento primária, secundária e terciária, conforme a Figura 6 ilustra. Na zona de cisalhamento primária, o material da peça é deformado plasticamente para formar o cavaco, com a maior parte do calor sendo transferida para o cavaco e a peça. Na zona de cisalhamento secundária, localizada na interface entre a ferramenta e o cavaco, o calor é gerado devido à deformação do material do cavaco e ao atrito na face de saída da ferramenta, sendo a região onde se encontra a maior concentração de calor. Por último, a zona de cisalhamento terciária ocorre na interface entre a ferramenta e a superfície recém-usinada da peça, onde o calor é influenciado pela geometria da ferramenta de corte, que forma um ângulo de folga com a peça. À medida que a ferramenta se desgasta, o atrito aumenta, gerando mais calor e potencialmente afetando a qualidade da superfície da peça usinada.

Figura 6 - Zonas de geração de calor durante o corte



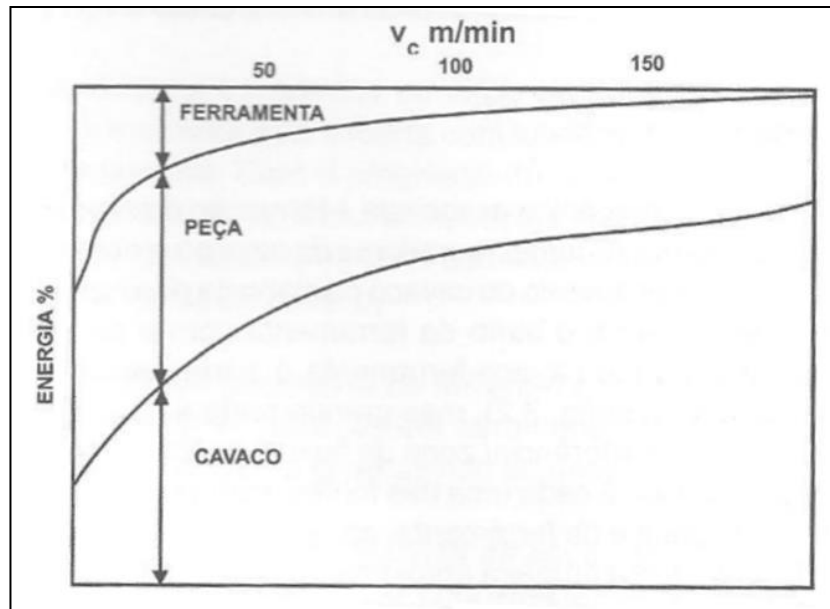
Fonte: Adaptado de Leonidas *et al.* (2022).

Segundo Machado, Abrão, Coelho e Silva (2015), na usinagem de alguns materiais, como aços endurecidos e ligas de níquel sob condições de corte específicas, o cavaco pode atingir até 1000 °C durante a operação. Contudo, a temperatura típica dos cavacos, ao usinar aços e materiais comuns, costuma situar-se na faixa de 500 °C a 650 °C. Um sinalizador marcante é a mudança de coloração, frequentemente observada como marrom ou azul, que ocorre poucos segundos após a geração de cavaco. Isso é causado pela formação de uma fina camada de óxido, a qual se desenvolve em temperaturas situadas entre 250 °C e 350 °C.

Dentro dos parâmetros de corte, à medida que a velocidade de corte aumenta, a proporção do calor total dissipada pelo cavaco também aumenta. Nesse caso, a maior parte do

calor é transportada pelo cavaco, enquanto uma fração menor é absorvida pela peça e uma quantidade ainda menor é transferida para a ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003). A Figura 7 indica a variação dessa proporção entre cavaco, peça e ferramenta citada anteriormente em função da velocidade de corte.

Figura 7 - Variação da distribuição de energia de corte com a velocidade



Fonte: Diniz; Marcondes; Coppini (2003).

Pode-se verificar nessa figura que a quantidade de calor que é dissipado pela ferramenta é menor, no entanto, devido à área de absorção de calor pela ferramenta ser limitada e permanecer constante ao longo do tempo, ao contrário do que ocorre com a peça, isso resulta no aumento de temperaturas significativas nessa região, contribuindo diretamente para o desgaste da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

Além da velocidade de corte, a geração de calor aumenta diretamente com o principal componente da força de corte. Dado que a força de corte está diretamente relacionada ao avanço e à profundidade de corte, conclui-se que, visando aumentar a eficiência na operação de usinagem, é recomendável elevar a velocidade, o avanço e a profundidade de corte. Contudo, é determinante impor restrições a esse aumento, uma vez que ele resulta simultaneamente em um aumento da temperatura que pode provocar modificações nas propriedades mecânicas da ferramenta, levando a um desgaste acelerado e impactando na produtividade, ao contrário do que se espera (MACHADO *et al.*, 2015).

O aumento da temperatura próximo ao gume pode resultar numa queda de dureza ou resistência ao cisalhamento do material da ferramenta, prejudicando toda a operação e sua

durabilidade. Assim, convém explorar meios para reduzir a temperatura gerada ou para gerenciar essa questão de forma a minimizar seu impacto negativo no processo e na produção.

Algumas das estratégias que estão atualmente sendo exploradas consistem em desenvolver materiais de melhor usinabilidade que apresentem menor tensão de cisalhamento e menor coeficiente de atrito com a ferramenta, facilitando a formação do cavaco e o desenvolvimento de materiais de ferramentas que suportem maiores taxas de calor, como metal duro com cobertura, diamante e cerâmicas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

2.2 MEDIÇÃO DA TEMPERATURA NA USINAGEM

No contexto da medição de temperatura durante o processo de corte, existem várias abordagens e dispositivos disponíveis, cada um com sua técnica específica, configuração e ponto de medição. No entanto, é importante destacar que, devido à curta duração do processo de corte, as técnicas de medição com alta resolução temporal são as mais adequadas para essa finalidade. Dentre elas, destacam-se métodos como medição de temperatura com termopares e termometria por imagem, todos eles sendo de grande interesse técnico para essa aplicação (KLOCKE, 2011). O Quadro 1 apresenta as vantagens e limitações de alguns métodos de medição utilizados atualmente.

É importante destacar que as diferenças de temperatura registrada nos diferentes métodos podem ser atribuídas a variações nas condições dos ensaios, a precisão dos instrumentos utilizados ou ao método de coleta de dados. Vale considerar essas variáveis ao interpretar resultados, para obter conclusões precisas sobre o comportamento térmico observado.

Os métodos experimentais são amplamente considerados confiáveis para determinar a temperatura de usinagem, apesar de serem mais demorados e custosos devido aos equipamentos e materiais envolvidos. Eles também representam um papel importante na avaliação do desempenho de modelos analíticos e numéricos na determinação da temperatura de usinagem. (BENABID *et al.*, 2014 apud LIMA, 2017).

De acordo com Maranhão *et al.* (2012, apud LIMA, 2017), a simulação por métodos numéricos apoia os ensaios experimentais, permitindo prever variáveis do processo de corte difíceis de medir diretamente, como forças de corte e tensões na superfície usinada. No entanto, o sucesso da simulação depende da proximidade entre os resultados simulados e os experimentais.

Quadro 1 - Vantagens e limitações dos métodos de medição de temperatura

Técnica de Medição		Vantagens	Limitações
Termopares	Ferramenta - Peça	Implementação simples; baixo custo.	Não aplicável com lubrificantes; medição média da área de contato.
	Embutido	Implementação simples; Baixo custo; ideal para informações sobre distribuição de calor dentro do material da peça.	Irreversível; implementação complexa; a temperatura da superfície não pode ser registrada
	Simples	Adequado para trabalhos experimentais de laboratório; útil para validar modelos FE.	Irreversível
Câmera Térmica		Medições muito rápidas; mapa de distribuição de temperatura; não destrutivo.	Linha visão direta ininterrupta; incertezas de calibração; não adequada para lubrificantes.
Termômetro infravermelho		Tempo de resposta rápido; não destrutivo; Alta precisão.	Incetezas de calibração; sensibilidade à temperatura ambiente.
Termômetro infravermelho de fibra óptica		Medições rápidas; pode ser usado em qualquer material e processo; alta precisão e versatilidade.	Irreversível quando embutido; implementação complexa para fresamentos; sensibilidade à temperatura ambiente.

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

A complexidade da medição de temperatura no fresamento resulta em uma quantidade reduzida de estudos nessa área, indicando claramente a existência de oportunidades para avanços adicionais, principalmente quanto a melhor adequação das técnicas de medição de temperatura durante o fresamento (LIMA, 2017).

O monitoramento da temperatura é crucial nas operações de usinagem, contudo, Leonidas *et al* (2022) concluiu que não há uma técnica de medição de temperatura universalmente ideal para todos os processos de usinagem de metais. A escolha da metodologia

mais adequada deve ser feita pelos pesquisadores, considerando seus critérios experimentais específicos e a área de estudo em foco.

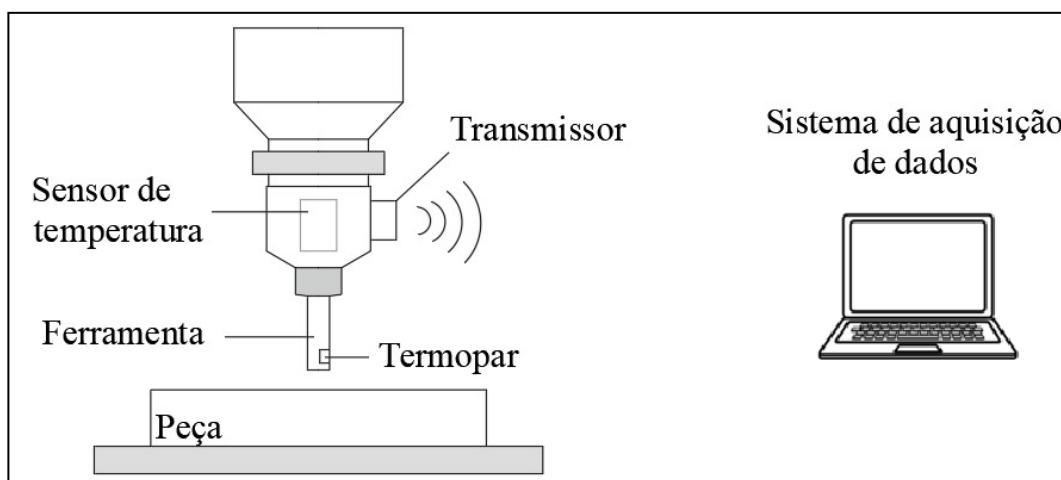
2.2.1 Medição de temperatura por termopares

A medição de temperatura por meio de termopares é uma das técnicas mais frequentemente utilizadas. A instalação de um termopar na ferramenta ou na peça de trabalho possibilita a obtenção de uma medição pontual do campo de temperatura. Existem diferentes tipos de termopares disponíveis, como os encapsulados, revestidos e de filamento único. Eles podem ser aplicados em furos cegos tanto na ferramenta quanto na peça de trabalho, conforme ilustra a Figura 8 (KLOCKE, 2011).

Pesquisadores têm empregado o termopar como uma ferramenta para explorar a correlação entre a temperatura e variáveis de corte, tais como a velocidade e o avanço (GROOVER, 2017).

Devido às características específicas dos processos de usinagem, a aplicação de certas técnicas é restrita, sendo a escolha baseada na melhor adaptação ao processo em questão. Um exemplo disso pode ser observado na operação de fresamento, onde a rotação da fresa pode limitar a viabilidade de usar um termopar inserido na ferramenta (LIMA, 2017).

Figura 8 - Medição de temperatura com termopar e transmissor



Fonte: Adaptado de Lima (2017).

Como a resolução temporal dessas técnicas é impactada tanto pelo tempo de resposta do termopar quanto pela transferência de calor entre o termopar e o dispositivo em teste, a resolução temporal geralmente é limitada. Além disso a medição com termopares pode ser

afetada por problemas como a resistência de transferência de calor devido à rugosidade do furo e à distância entre a superfície do termopar e o ponto de medição interno, resultando em diferenças de temperatura (KLOCKE, 2011).

De acordo com Leonidas *et al* (2022), a técnica do termopar embutido é útil para entender a distribuição de calor interna, embora não meça diretamente a temperatura da superfície. Complementando, Davies (2007), após revisar a evolução da medição térmica, apontou que a principal limitação dos termopares é que, ao fornecerem a temperatura de apenas um ponto, não conseguem caracterizar o fluxo de calor. Para medir adequadamente um campo térmico que afeta a carga termomecânica, é necessário utilizar uma configuração complexa com muitos termopares.

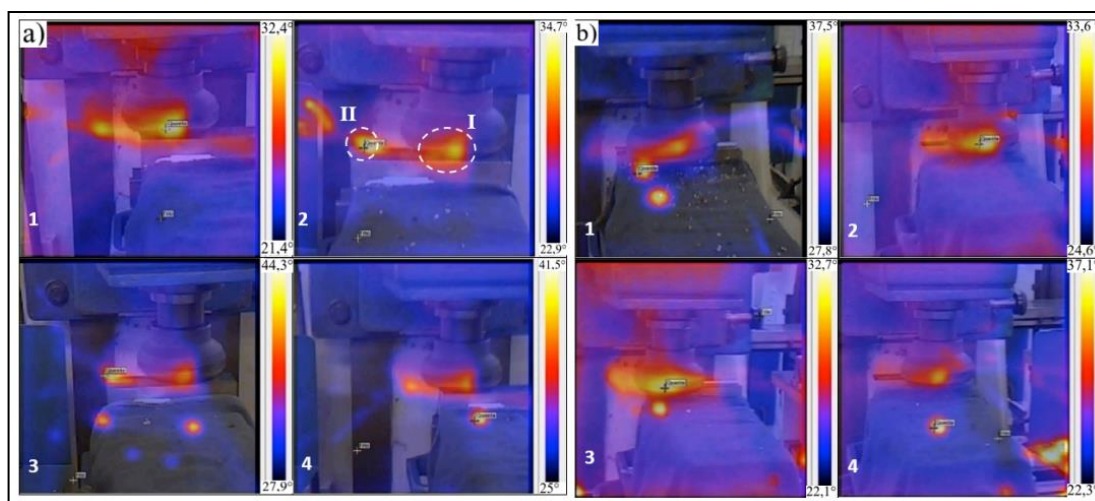
2.2.2 Medição de temperatura por termografia

A termografia é uma importante técnica de medição de temperatura, oferecendo uma representação visual da distribuição de temperatura em uma superfície. O presente método possui vantagens em relação aos métodos termoeletrônicos, incluindo resolução temporal mais rápida e capacidade de medição sem contato (KLOCKE, 2011). Os dispositivos operam com base na termometria infravermelha. Eles incorporam sensores que funcionam como transdutores, convertendo a radiação em sinais elétricos. Esses sinais são então processados para determinar a temperatura (KAPLAN, 2007 apud MOREIRA, 2021).

Câmeras IR medem a temperatura de vários pontos simultaneamente, fornecendo informações detalhadas sobre a distribuição de temperatura. Elas apresentam essa informação visualmente em uma imagem colorida que representa diferentes temperaturas, conforme é ilustrado na Figura 9. A principal vantagem é sua rápida resposta e a capacidade de avaliar perfis de temperatura em superfícies, tornando os termovisores uma escolha diferenciada (DAVIES *et al.*, 2007 apud MOREIRA, 2021).

Os sensores nas câmeras IR são sensíveis a faixas específicas do espectro infravermelho, incluindo o infravermelho de ondas longas (LWIR) de 8 μm a 14 μm , o infravermelho de ondas médias (MWIR) de 3 μm a 5 μm e o infravermelho de ondas curtas (SWIR) de 0,9 μm a 1,7 μm . Durante um ensaio termográfico, esses sensores detectam radiação de três fontes distintas: a radiação emitida pelo objeto, a radiação refletida pela vizinhança e a radiação emitida pela coluna de ar entre a câmera e o objeto (VOLLMER; MÖLLMANN, 2018 apud MOREIRA, 2021).

Figura 9 - Medição de temperatura com câmera térmica



Fonte: Dib, Benjamin e Jasinevicius (2015).

Medir com precisão a temperatura absoluta usando métodos de radiação é desafiador. O grau de emissão é influenciado por vários fatores, como temperatura, comprimento de onda, posição angular, material e condição da superfície, tornando a calibração difícil para superfícies específicas. Além disso, para medições precisas de temperatura, é essencial considerar a posição de medição, resolução temporal e local, além da duração da medição (KLOCKE, 2011). Machado *et al* (2011), complementa que o uso da câmera termográfica se limita a usinagens a seco, já que a presença do fluido de corte altera a emissão dos raios infravermelhos e a temperatura nas interfaces não pode ser avaliada.

Autores utilizaram câmeras IR para analisar temperaturas, Valiorgue *et al.* (2013) monitoraram a usinagem do aço inoxidável 316L por meio de uma câmera IR FLIR, com resolução de 320 x 256 pixels e banda espectral de 3,4 μm a 5 μm . No estudo realizado por Gaitonde *et al.* (2016), foi investigada a temperatura máxima gerada durante a usinagem do aço AISI D2 utilizando uma câmera IR da marca Raytek MM em conjunto com um sistema de coleta de dados. Mais tarde, Medina *et al.* (2017) utilizaram a câmera IR SATIR Hotfind-LXT para acompanhar as variações de temperatura durante o fresamento do aço inoxidável AISI 304. Entretanto, para Klocke (2011), a comparação direta das temperaturas obtidas por diferentes autores é complexa, uma vez que em cada trabalho teve condições experimentais diferentes umas das outras e aos numerosos parâmetros e condições de corte que podem afetar a temperatura.

3 METODOLOGIA

Este capítulo aborda os métodos empregados na condução dos testes experimentais. Aqui, são detalhados os parâmetros estabelecidos para os testes, assim como a ferramenta escolhida, equipamentos e materiais utilizados para medição e análise da temperatura. As estratégias e abordagens utilizadas integram o projeto de pesquisa do GUS em parceria com a empresa alemã OTEC.

As atividades e procedimentos citados foram desenvolvidos junto ao Laboratório de Usinagem, na sala 114, bloco D, na Universidade de Caxias do Sul.

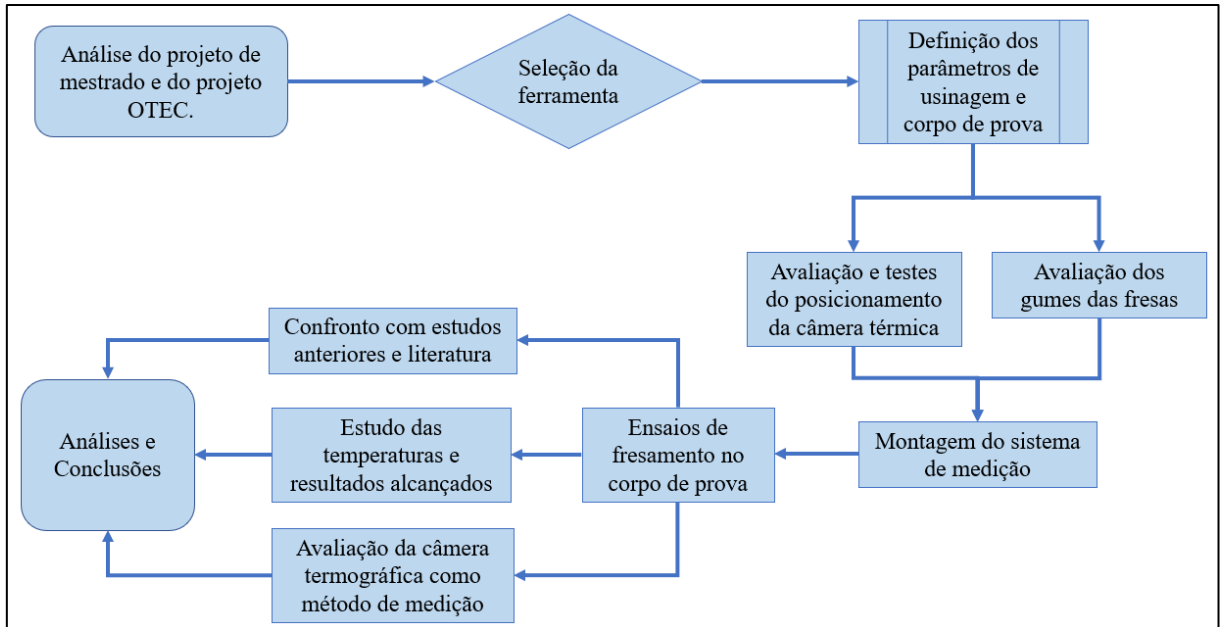
3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Com o intuito de conduzir testes experimentais, foram avaliadas as temperaturas da ferramenta durante o processo de fresamento de topo e validada a utilização da câmera térmica como método de medição. Para atingir esse propósito, uma fresa, sem tratamento, foi testada durante três passes em um corpo de prova com dimensões predefinidas, contabilizando um ensaio. Foram realizados cinco ensaios no total. Todos os procedimentos e métodos desenvolvidos neste trabalho, tanto para medição como para análise de resultados, foram executados exclusivamente com os recursos disponíveis nos laboratórios da Universidade de Caxias do Sul. Além disso, todos os ensaios ocorreram em espaço climatizado, sob condições ambientes monitoradas. Para tanto, utilizou-se um termo-higrômetro digital para monitorar a temperatura ambiente (T_{amb}) e a umidade relativa ambiente ($\varphi\%$).

Para a realização das medições, posicionou-se a câmera termográfica previamente calibrada em experimentos anteriores. A quantidade de testes foi analisada, a fim de obter uma média que proporcione uma comparação eficaz dos ensaios.

Posteriormente aos ensaios de fresamento, as temperaturas obtidas, pela câmera termográfica foram avaliadas, analisadas e então comparadas. Essa análise comparativa permite identificar correlações e diferenças significativas, além de uma compreensão mais profunda dos dados gerados durante os ensaios de fresamento e sobre o comportamento térmico da ferramenta. A figura 10 apresenta o fluxograma que ilustra as etapas delineadas para os ensaios experimentais conduzidos neste estudo.

Figura 10 - Fluxograma de atividades



Fonte: O autor (2024).

3.2 INSTRUMENTAÇÃO

Nessa seção, serão apresentados e descritos todos os equipamentos e parâmetros escolhidos e que foram fornecidos pela Universidade de Caxias do Sul para utilização ao decorrer dos ensaios.

3.2.1 Ferramentas

Para a realização dos ensaios, foi utilizada uma fresa de metal duro sem tratamento do gume, com diâmetro de 20 mm e quatro gumes. Na Figura 11 são mostrados detalhes da ferramenta.

Figura 11 - Fresa de topo utilizadas nos ensaios



Fonte: O autor (2024).

3.2.2 Parâmetros de Usinagem

Nos experimentos de usinagem conduzidos por este trabalho, os parâmetros de corte utilizados no centro de usinagem são apresentados a seguir, na tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de corte.

Parâmetros de Usinagem		
Descrição	Valor	Unidade
Velocidade de Corte (V_C)	180	m/min
Avanço por gume (f_z)	0,05	mm/rot
Profundidade de corte axial (a_p)	1,0	mm
Profundidade de corte lateral (a_e)	0,40	mm
Rotação	2865	rpm

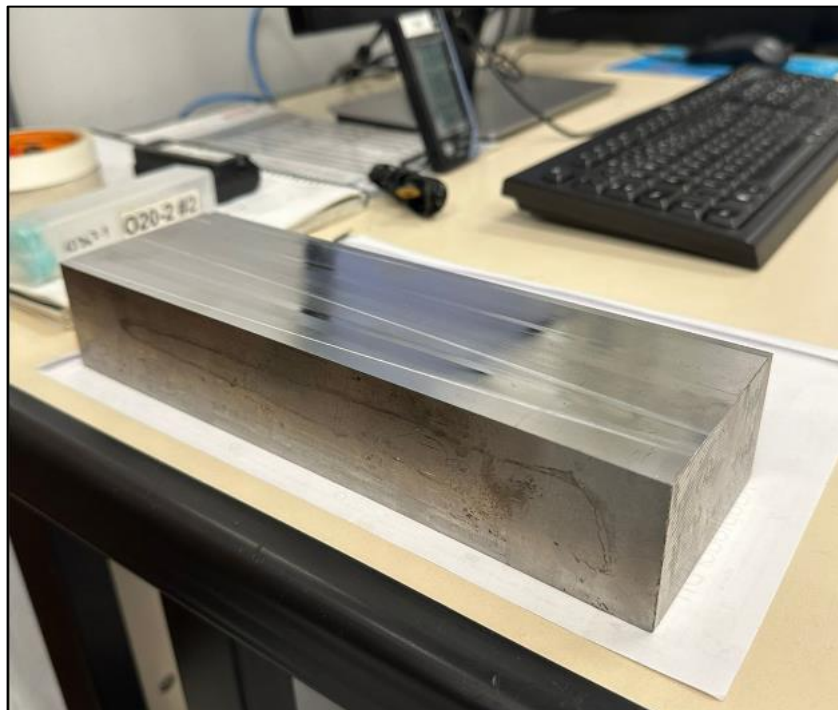
Fonte: O autor (2023).

A escolha dos parâmetros está diretamente alinhada com as investigações anteriores realizadas pelo Grupo de Usinagem da UCS (GUS), assim como, com os objetivos do projeto de mestrado em que este estudo está inserido, garantindo uma base sólida para comparação e progresso contínuo da pesquisa.

3.2.3 Corpo de prova

O corpo de prova utilizado para os ensaios de fresamento é o aço AISI P20, com dureza de 35-37 HRc. O bloco com faces retificadas possui as dimensões de 252 x 80 x 60 mm, conforme ilustra a figura 12. A seleção desse aço ocorreu devido à sua ampla aplicação nas indústrias de moldes e matrizes de injeção de plástico, sendo essa escolha reflexo da realidade predominante na região.

Figura 12 - Corpo de prova



Fonte: O autor (2023).

3.2.4 Centro de usinagem

Os ensaios de fresamento foram realizados em um centro de usinagem da marca Hartford (modelo LG-500), localizado no Laboratório de Usinagem da UCS (Figura 13). Seus

valores de rotação máxima e de potência podem chegar até 10.000 rpm e 10 kW, respectivamente.

Figura 13 - Centro de usinagem



Fonte: O autor (2023).

3.2.5 Sistema de medição com câmera térmica

Como método principal de medição de temperatura, foi utilizada uma câmera termográfica modelo FLIR Série T 360, fornecida pela Universidade de Caxias do Sul (Figura 14). O equipamento opera com base na termometria infravermelha e permite a realização de imagens que medem a temperatura de pontos ou áreas, o que permite uma avaliação precisa da distribuição térmica em múltiplos locais. O equipamento trabalha com uma faixa espectral de 7,5 a 13 μm , atende à faixa de temperatura de - 20 °C a 350 °C com uma resolução de 320 x 240 pixels e precisão de 2%, possibilitando uma sensibilidade térmica de até 0,05 °C. A câmera foi posicionada conforme utilizada em experimentos anteriores, feitos pelo grupo de usinagem para o projeto em parceria com a OTEC, para que fossem feitos outros testes de posicionamento.

Figura 14 - Câmera termográfica FLIR Série T 360



Fonte: Flir Systems Br (2010).

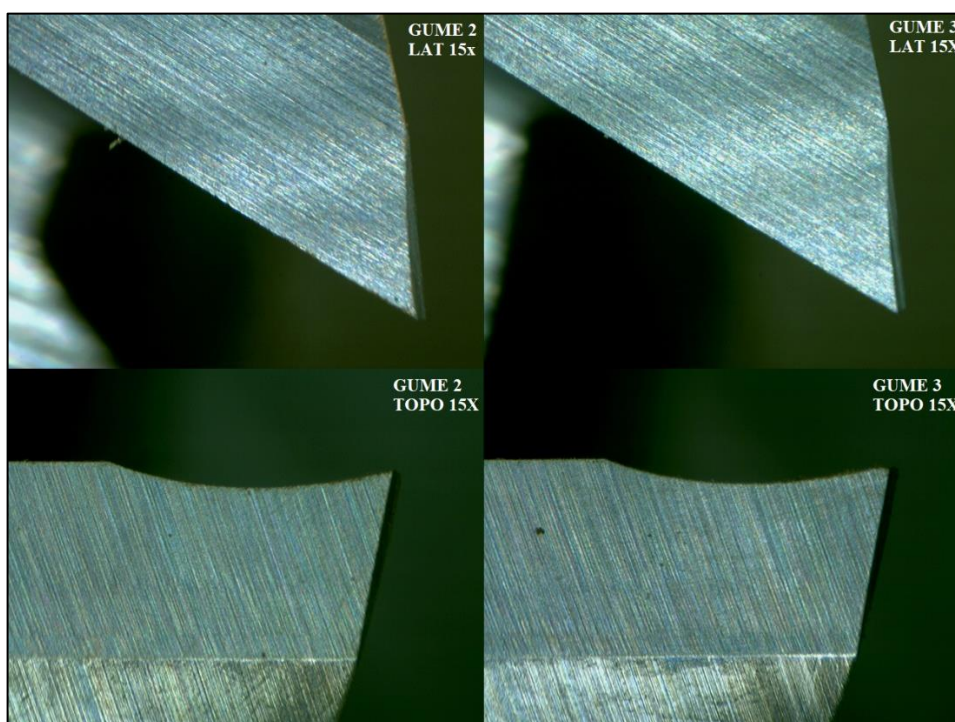
4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados provenientes dos processos práticos do estudo. Primeiramente, são exibidos os resultados dos procedimentos de preparação da ferramenta e do sistema de medição de temperatura utilizado, na sequência, são exibidos os resultados de medição alcançados nos ensaios de fresamento e, por fim, uma análise do método de medição utilizado.

4.1 AVALIAÇÃO DA FERRAMENTA

Referente a preparação da ferramenta utilizada nos ensaios, foi avaliado o estado dos gumes. Por meio de um estereoscópio, os gumes foram analisados sob ampliação de 15X para identificar qualquer sinal de desgaste, lascas ou irregularidades, certificando-se de que estão afiados e uniformes. O procedimento identifica quaisquer danos que possam ter ocorrido durante o processo de afiação e garante que a ferramenta esteja em condições de uso para realização dos ensaios. A figura 15 retrata a vista lateral e a vista de topo de dois gumes da ferramenta utilizada antes dos ensaios.

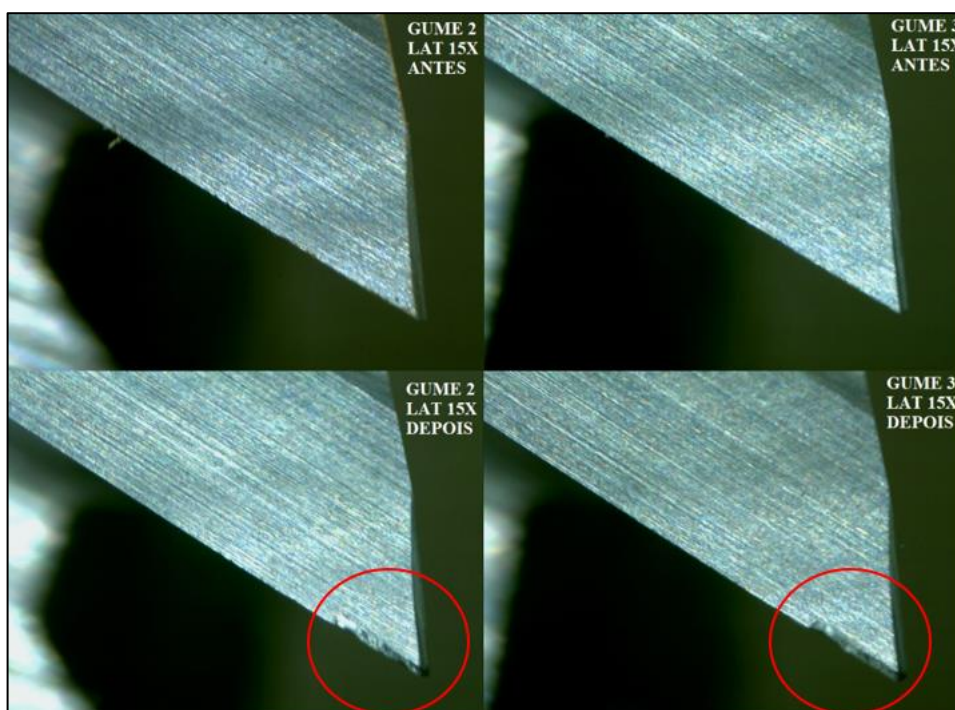
Figura 15 - Avaliação dos gumes antes dos ensaios



Fonte: O autor (2024).

Igualmente, o mesmo processo de análise das arestas de corte foi realizado após os cinco ensaios para avaliar a integridade e o desgaste das ferramentas. Essa análise pós-ensaio é crucial para entender como as condições de corte afetaram as ferramentas e para identificar a relação desse dano com o comportamento térmico obtido nos resultados das medições. A Figura 16 ilustra o desgaste ocorrido em dois gumes da ferramenta após a realização dos cinco ensaios.

Figura 16 - Avaliação dos gumes após os ensaios



Fonte: O autor (2024).

4.2 MONTAGEM E AQUISIÇÃO DE DADOS DA CÂMERA TERMOGRÁFICA.

Conforme mencionado na seção anterior, o processo de medição e o arranjo da câmera termográfica foram planejados com base em registros do projeto da OTEC. Após alguns testes de posicionamento e avaliação das imagens alcançadas, houve algumas melhorias devido a limitação de espaço. Assim, o equipamento ficou instalado ao lado centro de usinagem, garantindo um bom registro termográfico das operações.

A câmera foi montada em um tripé, posicionada a uma distância de 1,2 metro da ferramenta e a 1,02 metro do chão. Este modelo de câmera permite apenas a captura e exportação de fotos através do software fornecido pelo fabricante. Para contornar essa limitação, optou-se por gravar o visor do equipamento durante o ensaio, como mostrado na

Figura 17. Essa abordagem possibilita a visualização e a obtenção dos valores de temperatura em tempo real ao longo de todo o processo de medição.

Figura 17 - Posicionamento da câmera termográfica

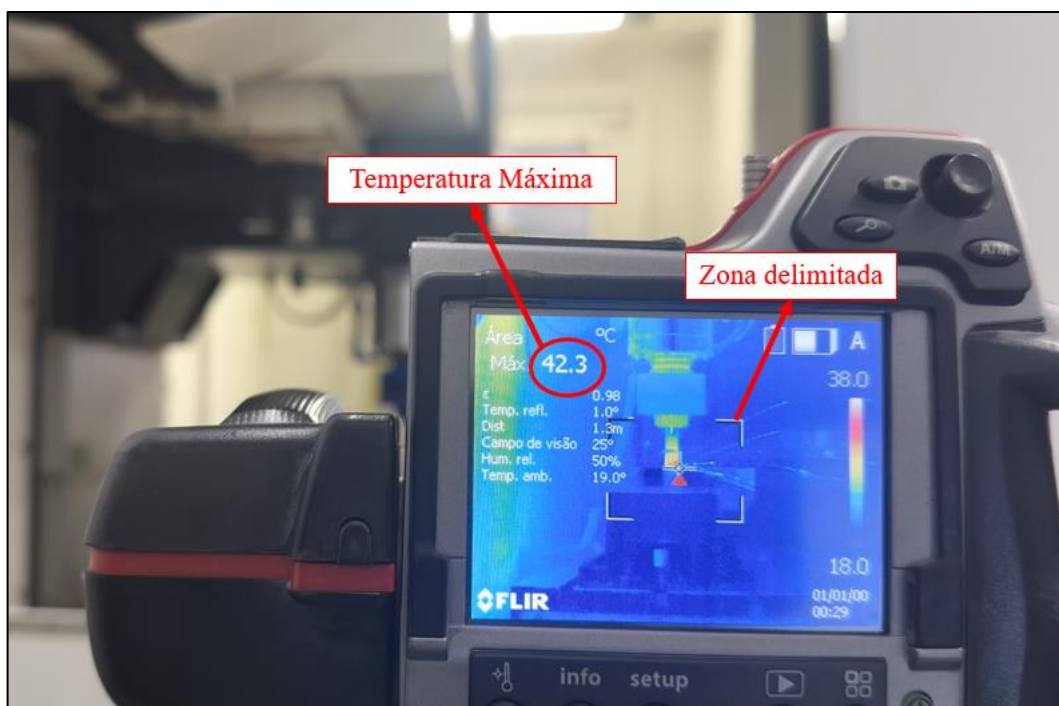


Fonte: O autor (2024).

Além disso, para a realização dos ensaios, a câmera termográfica foi configurada com a função de medição em área. Esse recurso específico permite que a câmera detecte e registre o ponto de temperatura mais elevada dentro de uma região delimitada e indicada no visor do equipamento, conforme ilustra a Figura 18. A figura também apresenta o resultado da gravação, mostrando como as variações de temperatura foram visualizadas e registradas.

As variações de temperatura são representadas por cores distintas ou gradientes no visor, proporcionando uma visão instantânea das condições térmicas no momento da medição. Essa representação visual é essencial para entender como o calor é distribuído e onde os pontos de temperatura mais elevada estão localizados dentro da região analisada.

Figura 18 - Resultado da gravação do visor da câmera termográfica



Fonte: O autor (2024).

Posteriormente aos ensaios, a aquisição dos dados do vídeo da câmera termográfica foi realizada com o auxílio de um *software* de edição de vídeo. Essa escolha foi feita para garantir maior exatidão na análise das informações térmicas capturadas. Utilizando o *software*, foi viável precisar o momento inicial de contato da ferramenta com a peça em cada ensaio, possibilitando ajustes temporais para garantir uniformidade em todos os testes. Junto disso, ele também facilitou pausar o vídeo de acordo com a precisão estipulada e retirar o valor de temperatura indicado pelo visor da câmera. Decidiu-se por registrar um dado de temperatura a cada meio segundo, totalizando cerca de 120 valores de temperatura para cada ensaio.

4.3 RESULTADO DAS MEDIÇÕES COM A CÂMERA TERMOGRÁFICA

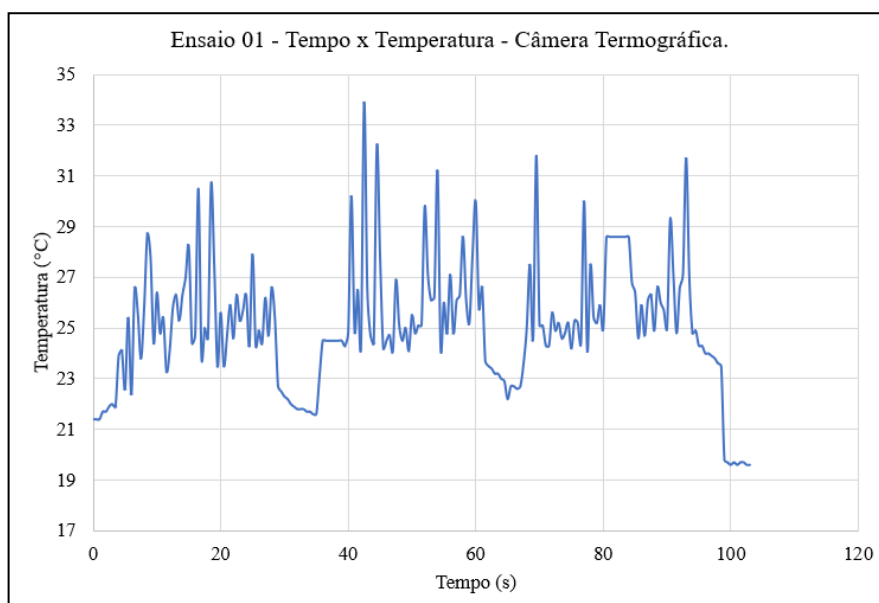
Após a conclusão dos ensaios e realização das medições através da câmera termográfica, os dados de temperatura obtidos são exibidos nesta seção.

4.3.1 Primeiro Ensaio

A Figura 19 mostra como a temperatura varia ao longo do tempo durante o primeiro ensaio. Inicialmente, a temperatura estável reflete a condição ambiente, enquanto o termo-

higrômetro no laboratório registrava 18,6 °C e 41% de umidade relativa do ar, a câmera termográfica identificava o ambiente com cerca de 19 °C. Todos os ensaios foram realizados no mesmo dia, com um intervalo de cerca de 5 minutos entre eles. Com o início do passe de usinagem, observam-se picos de temperatura, que ocorrem em ciclos de aproximadamente 26 segundos. Entre os passes, a temperatura diminui levemente enquanto a ferramenta retorna à posição inicial para começar um novo ciclo. Este comportamento cíclico é evidenciado no gráfico. Além disso, a temperatura inicial encontrada nos gráficos reflete o registro da ferramenta em rotação, sem o contato com a peça, que variou entre 19,5 °C e 21,5 °C. Ao final dos ensaios, a temperatura caiu abaixo desses valores devido a ferramenta sair da zona delimitada para o registro da câmera.

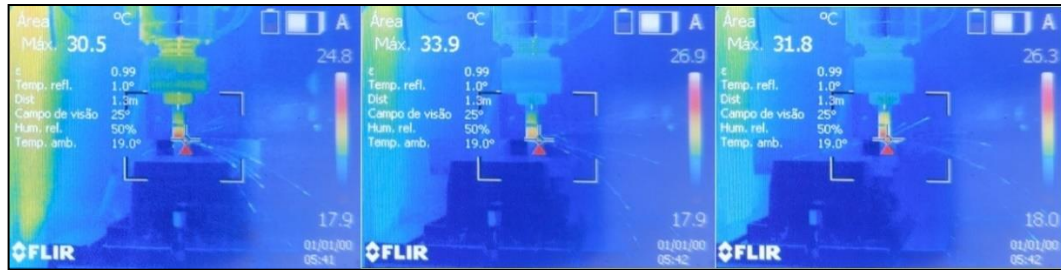
Figura 19- Gráfico de temperaturas do primeiro ensaio



Fonte: O autor (2024).

Nesse primeiro ensaio, obteve-se uma média geral de 25,86 °C e a temperatura mais alta registrada ocorreu no início do segundo passe de usinagem, atingindo 33,9 °C. Esse primeiro ensaio apresenta a menor amplitude de variação de temperatura e a maior variação de temperatura, de 10,4 °C, foi registrada também no segundo passe. Observa-se que durante o terceiro passe, a câmera registrou a mesma temperatura por aproximadamente 5 segundos consecutivos, o que pode sugerir a presença de erro ou uma imprecisão nas medições durante esse intervalo de tempo. A figura 20 ilustra a maior temperatura registrada em cada passe do primeiro ensaio.

Figura 20 - Máxima temperatura de cada passe do primeiro ensaio



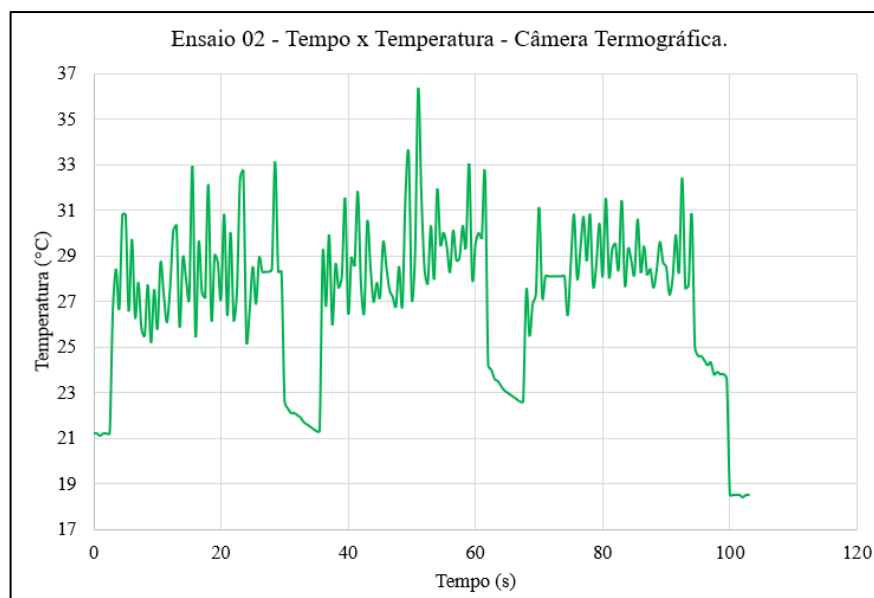
Fonte: O autor (2024).

O comportamento observado no primeiro ensaio revela um padrão previsto. Conforme Klocke (2011), o aumento de temperatura no decorrer dos passes de usinagem já indica um aumento da área de contato devido ao desgaste e, conseqüentemente, uma redução da performance de corte, que tende a ser revelada com maior ênfase nas operações seguintes.

4.3.2 Segundo ensaio

Na Figura 21, referente ao segundo ensaio, observa-se que a temperatura média foi de 28,69 °C. A temperatura máxima atingiu 36,3 °C e, similar ao primeiro ensaio, ocorreu durante o segundo passe de usinagem. No entanto, este pico de temperatura foi registrado aproximadamente 8,5 segundos mais tarde em comparação com o primeiro ensaio.

Figura 21 - Gráfico de temperaturas do segundo ensaio



Fonte: O autor (2024).

O aumento médio da temperatura no segundo ensaio fica evidenciado quando se observa que, além das máximas temperaturas para cada passe serem mais altas (Figura 22), as mínimas temperaturas também sofreram aumento. Seguindo o mesmo comportamento térmico do ensaio anterior, a maior variação ocorreu no segundo passe de usinagem, cerca de 10,3 °C. Além disso, o registro da câmera começou cerca de 1 segundo antes do que no ensaio anterior.

Figura 22 - Máxima temperatura de cada passe do segundo ensaio

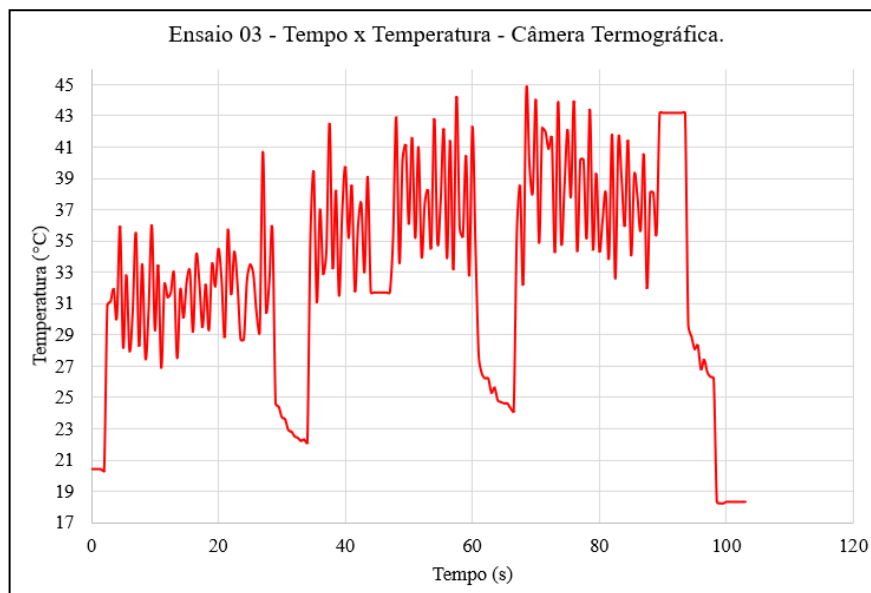


Fonte: O autor (2024).

4.3.3 Terceiro Ensaio

No terceiro ensaio desse estudo, ilustrado na figura 23, a temperatura média obtida foi de 35,75 °C e a maior temperatura registrada alcançou 44,7 °C. Diferente dos ensaios anteriores, o registro da máxima temperatura ocorreu no início do terceiro passe de usinagem.

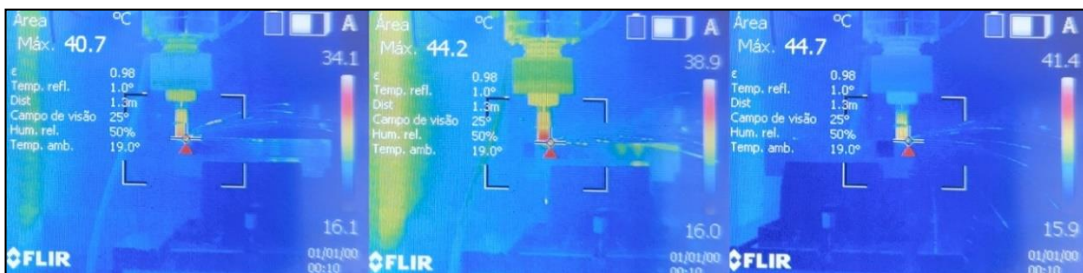
Figura 23 - Gráfico de temperaturas do terceiro ensaio



Fonte: O autor (2024).

Durante a operação, observa-se um aumento médio de temperatura de cerca de 7,06 °C em relação ao ensaio anterior e que a maior variação de temperatura aconteceu no primeiro passe de usinagem, cerca de 13,8°C. Assim como no primeiro ensaio, nota-se que, no final da operação, a câmera termográfica manteve o mesmo valor de temperatura por cerca de 4 segundos seguidos, o que pode indicar a ocorrência de um erro ou uma imprecisão nas medições durante esse período. A figura 24 ilustra imagens da temperatura máxima obtida para cada passe do terceiro ensaio.

Figura 24 - Máxima temperatura de cada passe do terceiro ensaio

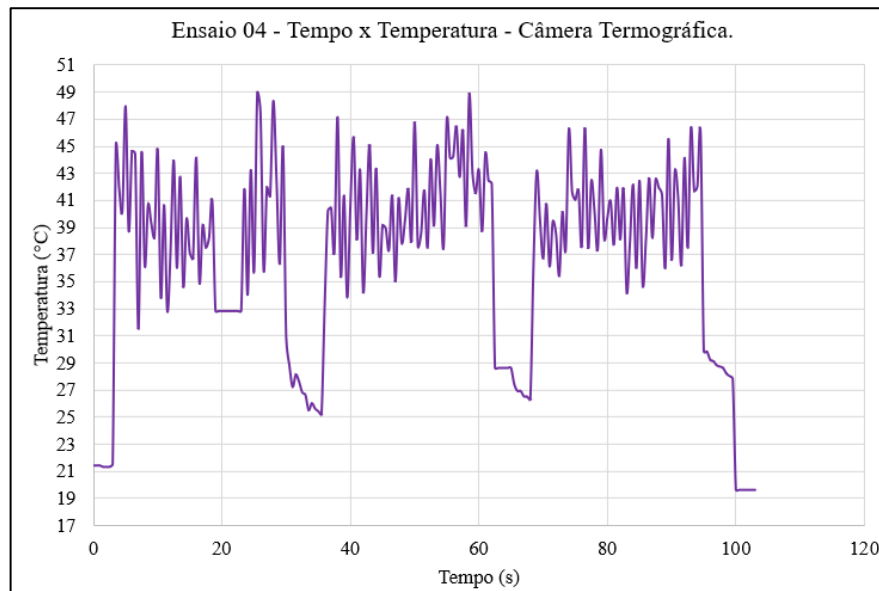


Fonte: O autor (2024).

4.3.4 Quarto ensaio

No quarto ensaio realizado, conforme apresenta a figura 25, a média geral de temperatura subiu para 39,96 °C e o registro mais alto alcançou 48,8°C.

Figura 25 - Gráfico de temperaturas do quarto ensaio



Fonte: O autor (2024)

Observa-se que durante esse ensaio o registro máximo ocorreu duas vezes, no primeiro e no segundo passe de usinagem (Figura 26). Houve um aumento médio de 4,21 °C em relação ao ensaio anterior e a temperatura mínima registrada durante o contato foi de 31,5 °C. Tal como ocorreu anteriormente, aos 19 segundos de operação, a temperatura manteve-se igual por 4,5 segundos consecutivos, o que pode sugerir a ocorrência de um erro durante esse intervalo.

Figura 26 - Máxima temperatura de cada passe do quarto ensaio

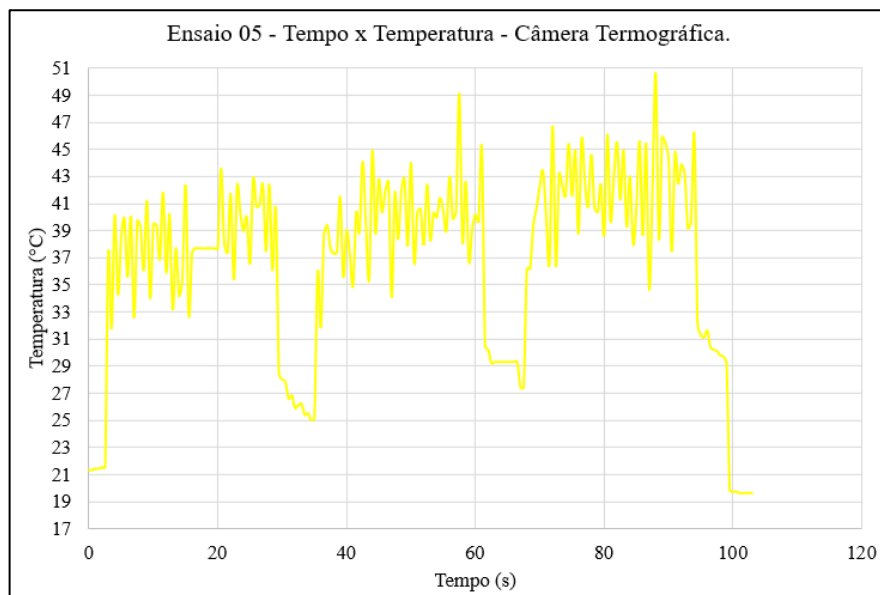


Fonte: O autor (2024).

4.3.5 Quinto Ensaio

No quinto e último ensaio (Figura 27), foi registrada a média de temperatura de 39,93 °C. Também foi registrada a maior temperatura, que ocorreu no terceiro e último passe de usinagem desse estudo, atingindo 50,6 °C.

Figura 27 - Gráfico de temperaturas do quinto ensaio



Fonte: O autor (2024)

Nesse quinto ensaio, utilizando os mesmos parâmetros em todos anteriores, os resultados seguem a mesma tendência. Diferentemente dos ensaios anteriores onde ocorreu um aumento de pelo menos 2 °C, a média das temperaturas registradas foi praticamente a mesma do quarto ensaio. A figura 28 ilustra as máximas temperatura obtidas para cada passe do quinto ensaio.

Figura 28 - Máxima temperatura de cada passe do quinto ensaio.



Fonte: O autor (2024)

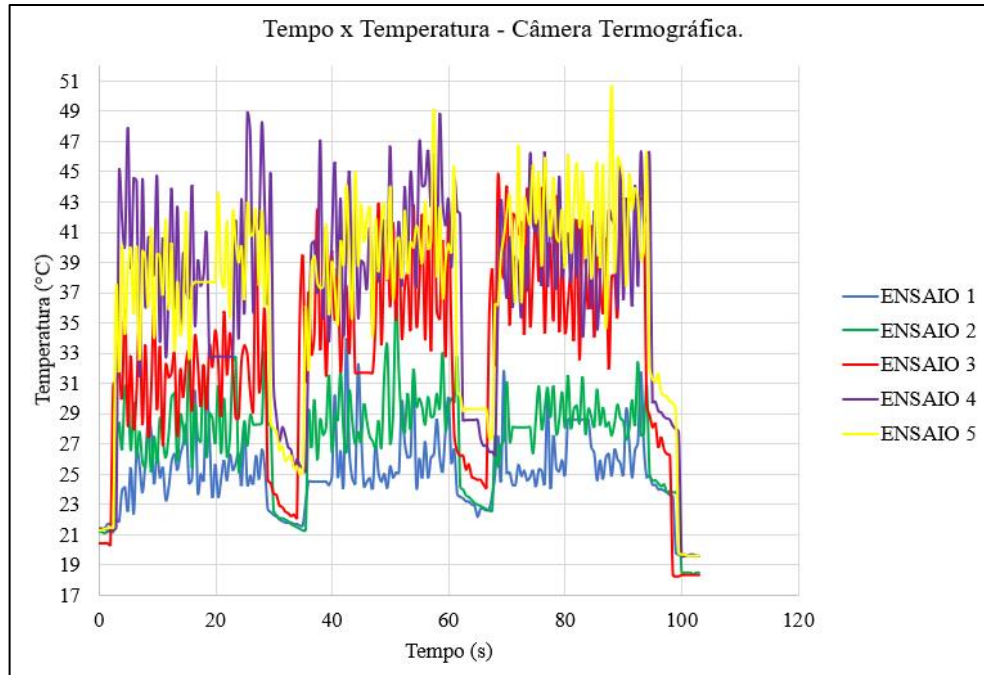
4.4 AVALIAÇÃO GERAL DAS TEMPERATURAS

Analisando o gráfico de temperatura em função do tempo para os cinco ensaios (Figura 29) e o gráfico da variação das temperaturas (Figura 30) nos consecutivos ensaios, revelam-se comportamentos térmicos a serem avaliados.

Primeiramente, os coincidentes declives evidenciados a cada ensaio são explicados pelo fato de que o fresamento foi realizado em três passes distintos. Após cada passe, a fresa retorna à posição inicial para começar o próximo corte. Durante esses intervalos, há uma breve pausa na geração de calor, mas a temperatura da fresa não retorna completamente ao valor inicial, devido ao acúmulo de calor residual. Isso fica evidenciado nos ensaios 4 e 5, onde as quedas de temperatura são menos pronunciadas, indicando uma dissipação de calor menos eficiente ou um acúmulo de calor mais significativo, visto que as temperaturas nos últimos ensaios são mais altas e a integridade da ferramenta foi comprometida em relação aos experimentos iniciais.

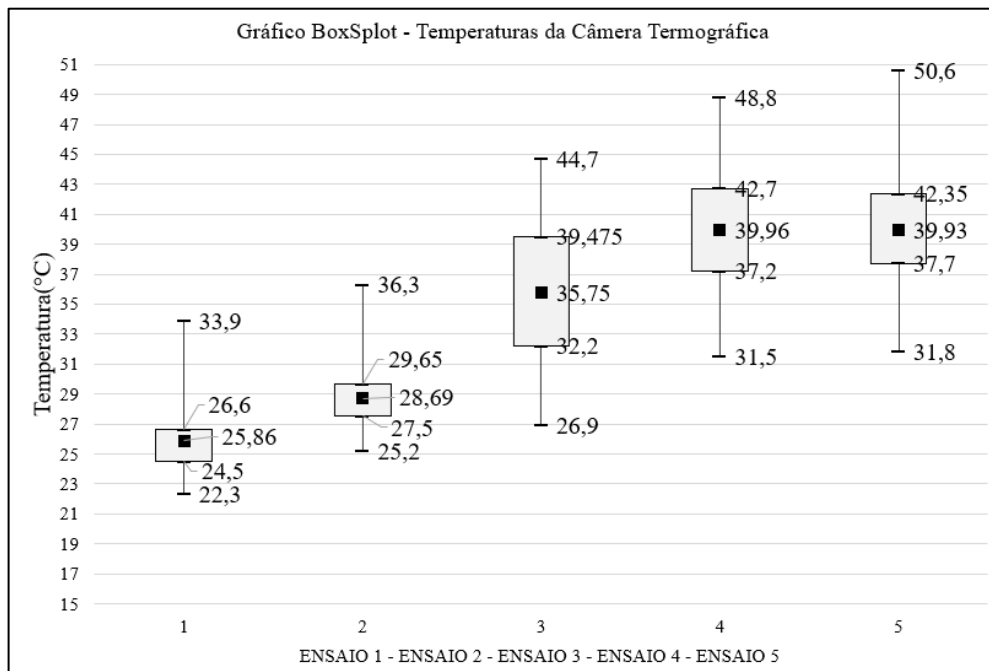
Como resultado, observa-se que, ao longo dos ensaios, tanto as temperaturas mínimas, durante os passes, como a temperatura média, aumentam progressivamente a cada novo passe, e em cada ensaio subsequente, as flutuações se tornam mais pronunciadas, especialmente no ensaio 5, que atinge temperaturas superiores a 50 °C.

Figura 29 - Gráfico de temperaturas dos cinco ensaios.



Fonte: O autor (2024).

Figura 30 - Gráfico de variação das temperaturas



Fonte: O autor (2024).

Conforme análise dos gráficos anteriores, observa-se que a cada ensaio, a distribuição das temperaturas possui intervalos interquartis mais amplos, especialmente a partir do ensaio 3, onde foram obtidas as máximas temperaturas registradas pela câmera termográfica. A

diferença média de temperatura no último ensaio foi de 14,07°C em relação ao primeiro e a diferença da máxima temperatura alcançou 16,7 °C. Os valores de média das temperaturas, apresentados anteriormente, desconsideraram os valores registrados pela câmera nos intervalos entre os passes de usinagem, em cada ensaio.

Essa tendência pode ser atribuída ao desgaste progressivo da ferramenta durante os testes sucessivos, este, causado em parte pela própria temperatura, conforme explica Leonidas *et al* (2022). No ensaio 1, a ferramenta, afiada, mantém temperaturas mais baixas e estáveis, com menos flutuações, refletindo um corte mais eficiente e com menos atrito.

À medida que a ferramenta é usada nos ensaios subsequentes, o aumento na geração de calor e na temperatura é impulsionado pelo desgaste da ferramenta. Isso leva a um aumento no coeficiente de atrito, na força de corte e, conseqüentemente, na temperatura (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

Junto a isso, Diniz *et al* (1999) identifica que a deformação e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento é fonte mais influente sob a geração de calor do processo. As tensões cisalhantes na interface entre a ferramenta e o cavaco são intensas o suficiente para provocar deformação plástica na superfície de saída. Devido às altas temperaturas geradas nessa região, a resistência ao escoamento do material da ferramenta próximo à interface diminui. Como resultado, o material é cisalhado juntamente com o cavaco e removido da superfície da ferramenta (MACHADO *et al.*,2015).

Lima (2017) analisou, dentre outros parâmetros, a influência do desgaste na temperatura e verificou que após o quinto ensaio, a diferença causada pelo desgaste foi cerca de 38 °C em relação ao primeiro. Resultados semelhantes foram corroborados por Toh (2005), que demonstrou que o desgaste visível no flanco da ferramenta pode elevar a temperatura de fresamento em até 70 °C em comparação com ferramentas novas.

No mesmo contexto, Klocke (2011) explica que, com o aumento da fricção entre a ferramenta e o material, devido ao desgaste, a área de contato entre a peça e a ferramenta também amplia. O aumento dessa zona de contato também faz com que o cavaco permaneça mais tempo em contato com a ferramenta. Isso gera mais calor, criando um ciclo vicioso que limita a vida útil da ferramenta de corte, evidenciado pelas oscilações mais intensas e pelos picos de temperatura mais altos (PANKINE, 1965; FERRARESI, 1977 *apud* MACHADO *et al.*,2015).

Além do atrito, Trent (1988) observa que existe uma zona de aderência entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, a qual aumenta à medida que o comprimento de contato durante a usinagem se prolonga. Em continuidade, Diniz *et al.* (2013) destacam que os níveis

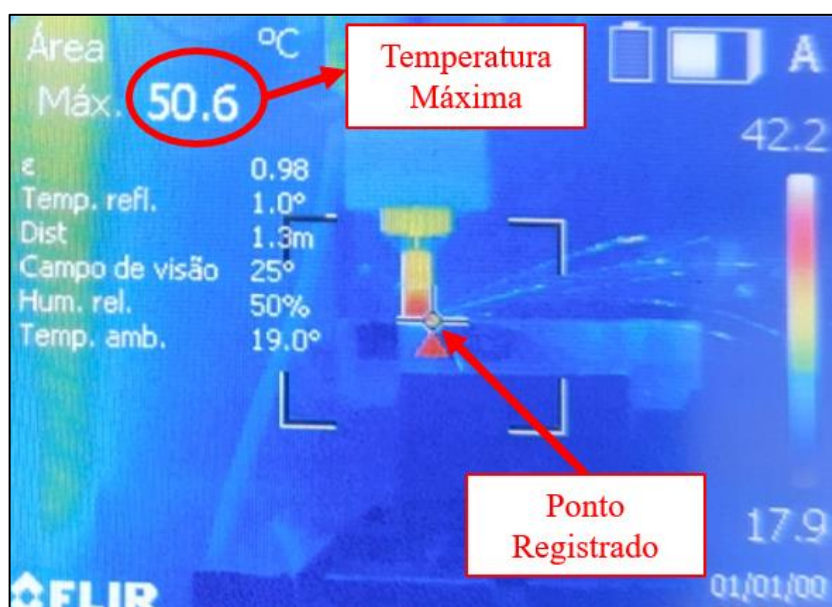
de temperatura estão diretamente ligados à extensão da zona de aderência. Em síntese, à medida que o comprimento da usinagem se amplia, é esperado que os níveis de temperatura aumentem, devido à aderência do material a superfície da ferramenta.

Em suma, o comportamento térmico observado ao longo dos ensaios indica um resultado já esperado devido ao impacto dos desgastes progressivos da ferramenta não tratada, principalmente nas zonas de cisalhamento secundária e terciária, as quais tendem a gerar mais calor para a ferramenta. Juntamente com a aderência de material e o acúmulo de calor residual, conforme as fresagens ocorriam, o aumento das temperaturas e da variabilidade térmica em cada ensaio subsequente reflete a deterioração da eficiência de corte e da estabilidade térmica da ferramenta ao longo dos ensaios.

4.4.1 Comportamento térmico durante o fresamento

Conforme observado na gravação do visor da tela durante os cinco ensaios de fresamento, ilustrados na Figura 31, a distribuição térmica revela que a maior concentração de calor é consistentemente registrada na ferramenta, indicada pela cor vermelha. Isso ocorre provavelmente devido a deformação plástica do cavaco e ao atrito gerado, mencionado anteriormente. Enquanto isso, as áreas circundantes exibem temperaturas mais baixas.

Figura 31 - Distribuição da temperatura



Fonte: O autor (2024).

A predominância de registros da maior temperatura no lado direito da ferramenta indica a possibilidade de alguns fatores. Segundo Trent (1984), quando há uma zona de fluxo de cavaco, notada na figura anterior, essa se torna a principal fonte de aquecimento na operação, criando uma região de intensa deformação plástica por cisalhamento. Sob essas circunstâncias, a zona de fluxo adquire características de um fluido viscoso em movimento, submetido a intensas tensões, resultando nas maiores temperaturas.

À medida que o calor é gerado continuamente na zona de fluxo durante a operação, o contato entre a ferramenta e o cavaco constitui uma fonte contínua de calor, criando um gradiente de temperatura na ferramenta, enquanto o calor se dissipa para o interior da ferramenta e para o ambiente (KAMINISE, 2012). Portanto, a presença de cavacos no lado direito da ferramenta pode contribuir para a medição de temperaturas mais altas nessa área.

Além disso, a posição e o ângulo da câmera termográfica em relação à ferramenta podem influenciar na captação do ponto indicado. A resolução e calibração da câmera termográfica também afetam a precisão da medição. Uma câmera com resolução limitada pode não captar pequenas variações de temperatura, e uma calibração imprecisa pode resultar em uma tendência de mostrar temperaturas mais altas em determinadas áreas.

4.5 AVALIAÇÃO DA CÂMERA TERMOGRÁFICA

Após a realização dos ensaios e a análise dos dados obtidos, discute-se que possíveis disparidades observadas nas medições de temperatura com a câmera podem ser atribuídas, em parte, a algumas condições experimentais a serem discutidas.

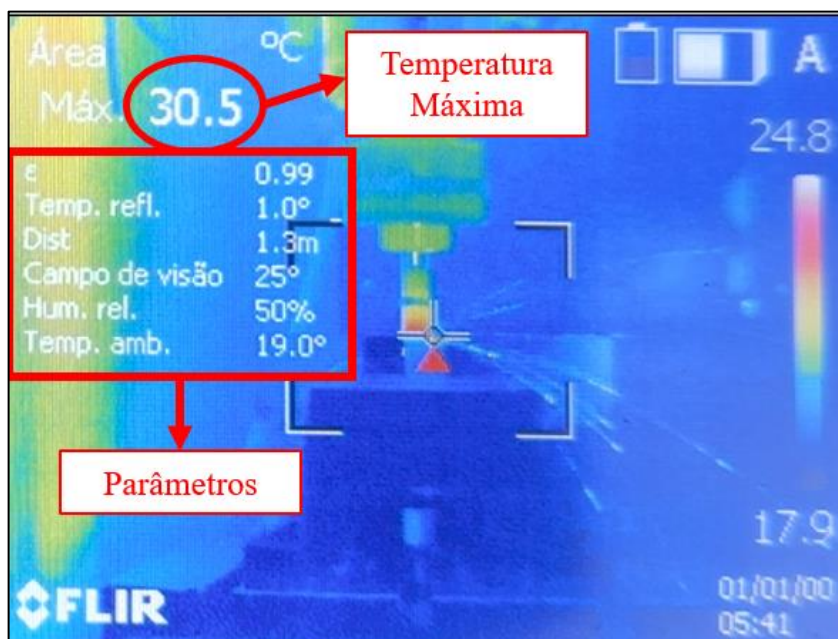
No decorrer deste estudo, a configuração utilizada para a câmera termográfica foi baseada na medição de área, permitindo uma análise abrangente das distribuições de temperatura ao longo de uma superfície maior, que oferece visão detalhada do campo térmico. No entanto, é importante notar que essa escolha também introduz desafios adicionais.

Conforme o visor da câmera aponta (Figura 32), nos ensaios realizados, a precisão de alguns critérios, como a lei de emissividade específica do material e a calibração do tempo de integração não foram ajustados com total exatidão. Além disso, nesse estudo, não se utilizou de modelos analíticos avançados, que auxiliam a validar mais precisamente as temperaturas reais da peça durante o processo de usinagem.

Essa integração de métodos experimentais e simulações numéricas não apenas fortalece o embasamento científico do estudo, mas também amplia as possibilidades de

inovação e melhoria contínua nas técnicas de usinagem, contribuindo significativamente para o avanço da área e para o desenvolvimento de práticas mais eficientes na indústria.

Figura 32 - Imagem obtida da câmera termográfica FLIR T360



Fonte: O autor (2024).

Sob este cenário, Pagotto (2023) comparou a medição de temperatura por imagem com um modelo analítico de cálculo no torneamento convencional a seco, e os resultados mostraram que os dados experimentais diferem significativamente dos valores previstos pelo modelo analítico, sendo os experimentais menores. Essa divergência indica que as medições experimentais não capturaram as mesmas regiões focadas pelo modelo analítico, por exemplo.

Do mesmo modo, a utilização de valores de emissividade inadequados pode comprometer a precisão das medições realizadas por dispositivos de temperatura sem contato. (MIHALOW, 1988; HOWELL; MENGÜÇ; SIEGEL, 2016; KING *et al.*, 2017 apud MOREIRA, 2019). É importante destacar que a emissividade de uma superfície pode variar consideravelmente com base na temperatura, no espectro e na direção, o que pode influenciar nos resultados apresentados.

Valiorgue (2013) configurou um dispositivo para calibração da emissividade no contexto de usinagem e obteve campos de temperatura que reforçam modelos analíticos e numéricos calculados pela lei de Planck, concluindo que a termografia infravermelha proporciona medições de temperatura com uma precisão espacial e temporal notável, superando, em muitos casos, os tradicionais termopares empregados na usinagem. Entretanto,

para alcançar seu potencial máximo, é necessário realizar os ajustes específicos citados anteriormente nessa seção.

A ausência de precisão de alguns desses parâmetros pode ter impactado a precisão dos dados térmicos obtidos pela câmera termográfica no presente estudo e, conseqüentemente, nas variações apresentadas. Igualmente, a limitação no método de aquisição de dados utilizado para extrair as informações térmicas desse modelo de câmera, que ocorre de forma manual, também pode ter exercido influência nos resultados. Dessa forma, é crucial considerar possíveis diferenças ao interpretar e comparar os resultados obtidos.

Ainda assim, as medições realizadas com a câmera demonstraram estar em conformidade com os padrões encontrados na literatura, e o comportamento térmico foi compatível com o esperado. Esses resultados positivos sugerem que, mesmo com certas limitações, a utilização da câmera termográfica é eficaz na leitura e obtenção de dados confiáveis e consistentes.

5 CONCLUSÃO

Com base nas análises e estudos apresentados ao longo deste trabalho, é possível concluir que as medições de temperatura realizadas forneceram dados importantes para entender o comportamento térmico durante o processo de fresamento. As curvas térmicas encontradas atendem as expectativas estabelecidas e seguem um padrão consistente, de acordo com outros estudos e com a literatura.

O estudo respondeu de maneira satisfatória aos objetivos propostos. O objetivo de investigar a distribuição de temperatura ao longo da superfície da ferramenta foi alcançado através da análise detalhada proporcionada pela câmera termográfica. Além disso, os objetivos específicos foram cumpridos. Identificaram-se os principais fatores que influenciam as variações de temperatura, compararam-se os resultados com estudos anteriores e literatura relevante. O aumento da temperatura durante os ensaios é indicativo da interação complexa entre a ferramenta, a peça e as condições de corte. Essa elevação térmica reflete a intensidade do calor gerado pelo atrito e pelo corte, assim como o desgaste progressivo e o aumento da área de contato que ocorre durante a operação e impacta diretamente na vida útil e no desempenho da ferramenta.

Em relação ao método de medição, este trabalho demonstra a eficácia da abordagem escolhida para a medição de temperatura no fresamento. A utilização da câmera termográfica oferece uma visão abrangente e não intrusiva das variações de temperatura, proporcionando dados confiáveis apesar das limitações para aquisição de dados e nas dificuldades de calibração.

Os resultados sugerem que as técnicas disponíveis atualmente tendem a ser complementares e, quando usadas em conjunto, oferecem uma compreensão mais completa e robusta dos fenômenos térmicos envolvidos no fresamento. O uso combinado dessas metodologias não apenas aprimora a precisão das medições, mas também contribui para o desenvolvimento de estratégias de usinagem mais eficientes e seguras, com potencial para otimizar a vida útil das ferramentas e a qualidade das peças usinadas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseando-se nos resultados obtidos, sugerem-se os seguintes tópicos complementares a este trabalho:

- a) Explorar o efeito do uso de fresas com diferentes tratamentos de gume na distribuição de temperatura da ferramenta.
- b) Avaliar a influência de diferentes parâmetros de usinagem na temperatura do fresamento.
- c) Comparar o método de medição por câmera termográfica com outras técnicas de medição de temperatura, como termopares na peça ou ferramenta.
- d) Investigar as variáveis que possam impactar na precisão das medições termográficas em diferentes condições operacionais.
- e) Desenvolver métodos para melhorar a aquisição de dados das medições termográficas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.** *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2006, 46, 782–800

BUCKELL, W. **Avaliação da Preparação de Gume Através do Processo de Escovação para Aplicação em Fresamento de Topo Reto.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, 2019.

DIB, M. H. M.; BENJAMIN, G. M.; JASINEVICIUS, R. G. **Uma análise experimental do fresamento discordante e concordante.** *Illuminart*, n. 13, p. 113-127, 2015. Disponível em: <http://ti.srt.ifsp.edu.br/revistailuminart/index.php/iluminart/article/view/271>. Acesso em: 10 out. 2023.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** 8. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2013. 270p.

END Milling Process & Different Types Of End Mills. *Wayken Rapid Manufacturing*, 2022. Disponível em: <https://waykenrm.com/blogs/end-milling/#Different-Categories-of-End-Mills>. Acesso em: 14 set. 2023.

FERRARESI D., **Fundamentos da usinagem dos metais.** São Paulo: E. Blucher, 3v, 1970.

FLIR SYSTEMS BRASIL. **VEJA O QUE VOCÊ ESTÁ PERDENDO: GUIA DE INFORMAÇÕES DE TERMOVISORES.** Brasil: [s. n.], 2010. 6 p. Disponível em: http://akindustrial.com.br/pdf/flir/Catalogo_serie_i_ate_serieT_v2.pdf. Acesso em: 30 nov. 2023.

GAITONDE, V. N. *et al.* **Machinability Evaluation in Hard Milling of AISI D2 Steel.** *Materials Research*, scielo, v. 19, p. 360 – 369, 04 2016.

GROOVER, M. P. **Fundamentos da moderna manufatura:** versão SI, volume 2 / Mikell P. Groover; tradução Givanildo Alves dos Santos, Luiz Claudio de Queiroz. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

LEONIDAS, E. *et al.* **A Comparative Review of Thermocouple and Infrared Radiation Temperature Measurement Methods during the Machining of Metals.** *Sensors*. 2022; 22(13):4693.

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. Dissertação (Doutorado Profissional em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

KLOCKE F., **Manufacturing Processes 1 – Cutting.** Springer, 2011.

- MACHADO, Álisson Rocha *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2015. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 14 set. 2023.
- M.A. Davies, T. Ueda, R. M'Saoubi, B. Mullany, A.L. Cooke, **On the measurement of temperature in material removal processes**, CIRP Annals e Manufacturing Technology 56 (2007) 581e604.
- MEDINA, N.; LAMBEA, P.; MANJABACAS, M. C.; MIGUEL, V.; MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, A.; COELLO, J. **Evaluating temperature in faced milling operations by infrared thermography**. Thermal Science, v. 21, n. 6 Part B, p. 3051–3061, 2017.
- MOREIRA, M. O. **Metodologia para medição de temperatura durante o fresamento de metais utilizando termografia direcional espectral**. 2021. 75 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.
- PAGOTTO, C. R. **Estudo comparativo entre a medição de temperatura no torneamento convencional a seco por imagem termográfica e o modelo analítico de Trigger e Chao**. Brazilian Journal of Development, v. 9, n. 1, p. 3470–3488, 13 jan. 2023.
- OTEC. **Edge Rounding and Polishing of Tools**. Apresentação, 2008.
- RODRIGUEZ C. J. C., **Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying microabrasive jet machining and brushing**. Tese de Doutorado, Universidade de Kassel, Alemanha. 205p., 2009.
- STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 4. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995.
- STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos abrasivos**. 3. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2005.
- TOH, C. K. **Comparison of chip surface temperature between up and down milling orientations in high speed rough milling of hardened steel**. Journal of Materials Processing Technology. v. 167, p.110–118, 2005.
- TRENT, E. M. **Metal cutting and the tribology of seizure: II movement of work material over the tool in metal cutting wear**. v.128, p.41-64, 1988b.
- TRENT, E.M., WRIGHT, P.K. **Metal cutting**, 4 ed., USA: Butterworth-Heinemann, 446p, 2000.
- VALIORGUE, F.; BROSSE, A.; NAISSON, P.; RECH, J.; HAMDI, H.; BERGHEAU, J. M. *et al.* **Emissivity calibration for temperatures measurement using thermography in the context of machining**. Applied Thermal Engineering, v. 58, n. 1-2, p. 321–326, 2013.
- ZEILMANN, 2023. **Relatório prévio Projeto Otec**. UCS. 2023