

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

LUCIANO PALMEIRA VILLOTE MOREIRA GUERRA

**ANÁLISE DE TEMPERATURA EM FERRAMENTAS POLIDAS NO PROCESSO
DE FRESAMENTO**

CAXIAS DO SUL

2023

LUCIANO PALMEIRA VILLOTE MOREIRA GUERRA

**ANÁLISE DE TEMPERATURA EM FERRAMENTAS POLIDAS NO PROCESSO
DE FRESAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso da disciplina TCC II (MEC0290AC), apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto e fabricação

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

CAXIAS DO SUL

2023

LUCIANO PALMEIRA VILLOTE MOREIRA GUERRA

**ANÁLISE DE TEMPERATURA EM FERRAMENTAS POLIDAS NO PROCESSO
DE FRESAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso da disciplina TCC II (MEC0290AC), apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto e fabricação

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

Banca Examinadora

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

Prof. Dr. Leandro L. Corso
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Ms. Rafael C. Dalegrave
Universidade de Caxias do Sul – UCS

RESUMO

Dentre todos os processos de usinagem, o fresamento é o processo que se destaca por sua produtividade e flexibilidade. A necessidade de desenvolvimento de processos mais eficientes, confiáveis, acessíveis e de qualidade fez com que fossem desenvolvidas tecnologias para aprimoramento do processo de fresamento, então para tal, inúmeros parâmetros de usinagem são estudados, como a geometria e materiais das ferramentas de corte, cuidados com o meio de corte e velocidade de corte. O parâmetro a ser avaliado neste trabalho é o tratamento de gume, portanto a ferramenta sofrerá polimento para que sejam avaliadas as melhorias no processo de usinagem. Os processos de fresamento possuem altas temperaturas, o que pode causar distorções e alterações microestruturais que impactarão diretamente os processos. Sendo assim, para análise destas temperaturas, este estudo desenvolveu o embutimento de termopares no corpo de prova, portanto foram apresentadas as temperaturas da peça. Neste trabalho foi possível desenvolver um método de furação de fresas eficiente, de fácil repetitividade e então preparar um furo em uma fresa sem tratamento de gume. Por fim, após comparação com outros estudos e análise dos dados de temperatura adquiridos, comprovou-se positivamente a eficácia do polimento de ferramentas com mídia HSC 1/300.

Palavras-chave: Fresamento; temperatura; tratamento de gume; polimento; medição de temperatura; termopar.

ABSTRACT

Among all machining processes, milling stands out for its high productivity and versatility. The requirement for more efficient, reliable, affordable and quality processes, inflicted those milling enhancements technologies were developed, to achieve that, countless machining variables were studied, such as different geometries and materials of cutting tools, cutting speeds and feed with the cutting environment. The machining parameter to be validated in this study is the cutting edge preparation. The tool will be polished so its influence on improvements in the machining are validated. Milling process can achieve high temperatures along the cutting, which can cause micro-structural distortions and modifications that can impact the machining process. Therefore, to analyze the temperatures, this study achieved to embed thermocouples on the workpiece, so the temperature data presented is for workpieces measurements. This paper managed to develop an efficient and simple reproduction method to drill the tools, consequently perform a perforation on a tool without edge preparation. Finally, after confronting the results with other studies and acquisition of temperature data, the polishing effectiveness of top milling tools edge preparation using the HSC 1/300 granulate has been positively substantiated.

Keywords: Milling; temperature; cutting edge preparation; polishing; measurement; thermocouple.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fresamento frontal e tangencial.....	13
Figura 2 – Movimentos de concordância.....	14
Figura 3 – Terminologia das fresas de topo	15
Figura 4 – Geometria da extremidade das fresas de topo	16
Figura 5 – Exemplos de fresas de topo reto.....	16
Figura 6 – Geometrias de gume.....	18
Figura 7 – Variações de geometria de gume.....	18
Figura 8 – Esquema de geometria do gume	19
Figura 9 – Temperatura interna da ferramenta para diferentes razões	19
Figura 10 – Processos de acabamento.....	20
Figura 11 – Cadeia sequencial de influências do tratamento de gume na usinagem	21
Figura 12 – Polimento por oscilação	22
Figura 13 – Exemplo de distribuição de calor e temperaturas na usinagem de aço .	24
Figura 14 – Regiões de calor durante formação de cavacos	25
Figura 15 – Esquema experimental para medição por pirômetro bicolor	28
Figura 16 – Medições de = temperatura da ferramenta por câmera infravermelha...	29
Figura 17 – Esquemático de termopar embutido na ferramenta durante corte	30
Figura 18 – Medição sem fio de termopar inserido na ferramenta em fresamento ...	31
Figura 19 – Configuração experimental de medição sem fio por termopar inserido à ferramenta.....	31
Figura 20 – Gráfico de temperatura x tempo para diferentes velocidades de corte ..	32
Figura 21 – Embutimento de termopar em inserto de metal duro	32
Figura 22 – Corpo de prova AISI P20	35
Figura 23 – Centro de usinagem Hartford LG-500	36
Figura 24 – Polimento da ferramenta por arraste.....	37
Figura 25 – Embutimento de termopares ao corpo de prova	38
Figura 26 – Proposta de medição de temperatura por termopar.....	39
Figura 27 – Módulo de aquisição de termopares QuantumX MAX1609KB	40
Figura 28 – Interface para análise de dados	40
Figura 29 – Equipamento EDM 440 NC	41
Figura 30 – Estação de usinagem preparada para ensaios	42
Figura 31 – Gume de ferramenta sem tratamento	43

Figura 32 – Gume de ferramenta com arraste em HSC 1/300	44
Figura 33 – Gume de ferramenta com arraste em H 4/400.....	44
Figura 34 – Fresa montada em gabarito na máquina de medir por coordenadas.....	45
Figura 35 – Medidas em <i>software</i> 3D para análise com modelo real.....	46
Figura 36 – Corpo de prova usinado e pronto para inserção de termopares	47
Figura 37 – Termopares inseridos à peça.....	48
Figura 38 – Peça gabarito para eletroerosão em <i>software</i>	49
Figura 39 - Posicionamento de conjunto peça gabarito e fresa teste na eletroerosão	50
Figura 40 – Fresa sem tratamento preparada para inserção de termopares	51
Figura 41 – Gráfico da primeira posição de termopares para ferramenta afiada	52
Figura 42 – Gráfico da segunda posição de termopares para ferramenta afiada.....	53
Figura 43 – Gráfico da terceira posição de termopares para ferramenta afiada	54
Figura 44 – Gráfico geral para ensaio de ferramenta afiada	55
Figura 45 – Gráfico geral de temperaturas de fresas afiadas de 6 <i>mm</i>	56
Figura 46 – Gráfico da primeira posição de termopares para ferramenta H 4/400....	57
Figura 47 – Gráfico da segunda posição de termopares para ferramenta H 4/400...58	
Figura 48 – Gráfico da terceira posição de termopares para ferramenta H 4/400.....	59
Figura 49 – Gráfico geral de termopares para ferramenta H 4/400.....	60
Figura 50 – Gráfico geral de temperaturas de fresas H 4/400 de 6 <i>mm</i>	61
Figura 51 – Gráfico da primeira posição de termopares para ferramenta HSC 1/300	62
Figura 52 – Gráfico da segunda posição de termopares para ferramenta HSC 1/300	63
Figura 53 – Gráfico da terceira posição de termopares para ferramenta HSC 1/300	64
Figura 54 – Gráfico geral de termopares para ferramenta HSC 1/300.....	65
Figura 55 – Gráfico geral de temperaturas de fresas HSC 1/300 de 6 <i>mm</i>	66
Figura 56 – Gráfico geral de temperaturas para termopar inserido à peça	67
Figura 57 – Gráfico de temperaturas obtido por Gräbner.....	68
Figura 58 – Gráfico geral de temperaturas para termopar inserido à peça	68
Figura 59 – Gráfico de temperaturas médias na ferramenta.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidades e limitações de métodos de medição de temperatura	27
Tabela 2 – Parâmetros de corte	34
Tabela 3 – Ângulos da fresa de topo.....	35
1. Tabela 4 – Divergência de medidas entre modelos real e 3D	46
Tabela 5 – Temperaturas máximas para ferramentas tratadas e não tratadas	69
Tabela 6 – Temperaturas máximas para ferramentas tratadas e não tratadas	70

LISTA DE SÍMBOLOS

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

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	associação brasileira de normas técnicas
AISI	<i>american iron and steel institute</i>
PPGMEC	programa de pós graduação de engenharia mecânica
3D	tridimensional
UCS	Universidade de Caxias do Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	JUSTIFICATIVA.....	11
1.2	AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO.....	12
1.3	OBJETIVO	12
1.3.1	Objetivo geral	12
1.3.2	Objetivos específicos	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	FRESAMENTO	13
2.1.1	Tipos de fresamento	13
2.1.2	Fresamento de topo reto	15
2.1.3	Temperatura no fresamento	17
2.1.4	Micro e macro geometrias de gume	17
2.2	TRATAMENTO DE FERRAMENTA.....	20
2.2.1	Polimento de ferramenta	22
2.3	TEMPERATURA DA FERRAMENTA	23
2.3.1	Balanco energético	24
2.3.2	Medições de temperatura da ferramenta	26
2.3.2.1	Propostas de medição de temperatura	27
2.3.2.2	Medição por pirômetro de duas cores com fibra ótica	28
2.3.2.3	Medição por câmera infra vermelha	29
2.3.2.4	Medição por termopar inserido na ferramenta	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES	33
3.2	INSTRUMENTAÇÃO	34
3.2.1	Parâmetros de operação	34
3.2.2	Ferramenta	35
3.2.3	Corpo de prova	35
3.2.4	Equipamentos	36
3.2.4.1	Centro de usinagem	36
3.2.4.2	Polimento da ferramenta	37
3.2.5	Embutimento de termopares ao corpo de prova	38
3.2.6	Medição de temperatura por termopar inserido na ferramenta	39

3.2.7	Medição de temperatura por termopar inserido na peça	40
3.2.8	Embutimento de termopar às ferramentas	41
3.3	PREPARAÇÃO PARA USINAGEM	42
4	RESULTADOS	43
4.1	ANÁLISES DAS FERRAMENTAS	43
4.1.1	Avaliação de integridade dos gumes	43
4.1.2	Comparativo entre modelo real e modelo 3D da fresa	45
4.2	PREPARAÇÃO DE EMBUTIMENTOS	47
4.2.1	Embutimento ao corpo de prova	47
4.2.1.1	Preparação do corpo de prova	47
4.2.1.2	Fixação de termopares ao corpo de prova.....	48
4.2.2	Embutimento da ferramenta	49
4.2.2.1	Posicionamento da eletroerosão	49
4.2.2.2	Furação das fresas com eletroerosão	50
4.2.2.3	Comparativo entre modelo real e modelo 3D da fresa pós furação	51
4.3	Avaliação de temperaturas para termopar embutido à peça	52
4.3.1	Ferramenta sem tratamento.....	52
4.3.1.1	Primeira posição de termopares	52
4.3.1.2	Segunda posição de termopares	53
4.3.1.3	Terceira posição de termopares.....	54
4.3.1.4	Temperaturas gerais para as três posições de termopares	55
4.3.1.5	Comparativos com outros trabalhos sem tratamento.....	56
4.3.2	Ferramenta polida com H 4/400	57
4.3.2.1	Primeira posição de termopares	57
4.3.2.2	Segunda posição de termopares	58
4.3.2.3	Terceira posição de termopares.....	59
4.3.2.4	Temperaturas gerais para as três posições de termopares	60
4.3.2.5	Comparativos com outros trabalhos para polimento H 4/400	61
4.3.3	Ferramenta polida com HSC 1/300.....	62
4.3.3.1	Primeira posição de termopares	62
4.3.3.2	Segunda posição de termopares	63
4.3.3.3	Terceira posição de termopares.....	64
4.3.3.4	Temperaturas gerais para as três posições de termopares	65
4.3.3.5	Comparativos com outros trabalhos para polimento HSC 1/300	66

4.3.4	Gráfico de temperaturas para todas as ferramentas	67
4.3.5	Avaliação do efeito do polimento	69
4.4	Temperaturas em ferramenta sem tratamento	71
5	CONCLUSÃO	72
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da extração de metais foi um grande marco e um dos primeiros passos na história da tecnologia de materiais e da manufatura. Com o passar dos séculos, o interesse pelo uso de ferro e aço aumentou significativamente. Ainda hoje existe uma constante demanda por desenvolvimento de processos de corte mais acessíveis e de qualidade (KLOCKE, 2011).

A forma e as dimensões das ferramentas de corte definem sua eficiência de usinagem no processo, portanto uma boa análise no momento da escolha da ferramenta é de extrema importância para a fabricação da peça. Os termos fundamentais relativos às ferramentas de corte são normalizados por normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (FRACARO, 2017).

O processo de usinagem pode ser definido como aquelas operações em que se confere à peça uma forma, dimensões ou o acabamento, em que se produz o cavaco (FERRARESI, 1970). O processo de corte é o ponto essencial na usinagem já que os problemas relacionados são decorrentes do processo de formação de cavaco e este pode ser utilizado para diagnosticar problemas e possíveis melhorias no processo de corte. (FRACARO, 2017). Portanto todos os parâmetros de corte, como a geometria de corte, são constantemente analisados e aprimorados (KLOCKE, 2011). O processo de usinagem a ser abordado neste estudo é o fresamento. Para o fresamento utilizado serão definidos parâmetros fixos para que a análise na temperatura seja o mais fiel possível.

Para que se obtenham os requisitos necessários do produto, parâmetros de usinagem e qualidade final do produto, deve-se ter a melhor harmonia possível entre as seguintes especificações: material, forma e dimensões da peça; cinemática e condições de corte; fluido de corte e condições de temperatura; material, geometria e preparação de gume da ferramenta (RODRÍGUEZ, 2009).

A aplicação de tratamentos no gume tem como objetivo eliminar os problemas de defeitos e irregularidades, pois esta preparação define a geometria e micro topografia do gume, e a microestrutura da face e do flanco da ferramenta. Esta preparação do gume resulta em melhorias na ferramenta como vida útil e confiabilidade, e qualidade final da peça usinada (RODRÍGUEZ, 2009). Sendo assim, neste trabalho foi realizado o polimento da ferramenta para posterior análise sobre a temperatura interna da ferramenta.

1.1 JUSTIFICATIVA

A necessidade de constante aprimoramento da performance de ferramentas de corte direciona fabricantes para melhorias de ferramentas padrões, como modificar a geometria de corte e tratar o gume podem aumentar a vida útil da ferramenta (ZEILMANN e BORDIN, 2014). Sendo assim, desenvolver um método que diminua a temperatura na ferramenta também pode influenciar positivamente a vida útil e a produtividade da ferramenta. Sendo assim, será empregado o polimento da ferramenta.

É de suma importância compreender os parâmetros que impactam a geração de calor e também desenvolver novas metodologias que possibilitem fluxos de calor e distribuição de temperatura na ferramenta e na peça que impacte positivamente na vida útil (LIMA, 2017).

A análise de temperaturas de ferramentas nos processos de usinagem é complexa e de difícil aplicação. Então por muitas vezes a temperatura da ferramenta não recebe a devida importância em processos de usinagem.

Tendo em vista estes pontos, este trabalho tem como foco utilizar um método medição de temperatura da ferramenta que seja eficiente e aplicável para processos de fresamento com o intuito de avaliar a influência do polimento das ferramentas em suas temperaturas, confrontando assim os resultados com trabalhos anteriores relacionados ao mesmo tema e área.

1.2 AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO

A Universidade de Caxias do Sul (UCS) é uma Instituição Comunitária de Ensino Superior que atua na região nordeste do Rio Grande do Sul. Fundada oficialmente em 10 de fevereiro de 1967, portanto possui 55 anos de experiência. Atualmente conta com 126 cursos de graduação, 29 mestrados e doutorados, 800 laboratórios em 12 cidades e mais de 100 mil pessoas formadas em diversas áreas do conhecimento.

O presente trabalho será desenvolvido em conjunto com o grupo de usinagem e o Programa de Mestrado desta universidade (PPGMEC). Será totalmente elaborado nas dependências do Laboratório de Usinagem onde será realizado o polimento da ferramenta e onde serão feitos os testes em fresamento utilizando-se da ferramenta de corte do tipo fresa de topo de metal duro. Serão empregados equipamentos para medições de desgaste e equipamentos para medição de temperatura interna da ferramenta.

1.3 OBJETIVO

1.3.1 Objetivo geral

Analisar as temperaturas da ferramenta e da peça para diferentes tratamentos de gume durante o processo de fresamento de topo reto.

1.3.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo proposto, as seguintes atividades foram previstas:

- a) selecionar e aplicar um método de medição de temperatura ao processo de fresamento.
- b) avaliar a influência do polimento da ferramenta sobre as temperaturas internas da ferramenta e da peça.
- c) comparar e analisar os resultados com trabalhos anteriores e referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FRESAMENTO

Dentre todos os processos de usinagem, como a furação, o torneamento, o mandrilhamento e outros, o fresamento é o processo a ser abordado neste estudo e, portanto, definido a seguir. O fresamento é um processo mecânico de usinagem que tem como objetivo obter superfícies de várias formas geométricas definidas e executadas por ferramentas geralmente multicortantes (REBEYKA, 2016). Para este processo, a ferramenta fica em rotação e a peça ou a ferramenta se deslocam conforme uma trajetória definida. O fresamento é considerado o processo mais versátil na usinagem (FERRARESI, 1970; DINIZ et al., 1999).

2.1.1 Tipos de fresamento

Existem dois tipos de fresamento: o fresamento frontal e o fresamento tangencial. O fresamento frontal possui alta produtividade e tem como objetivo obter superfícies planas perpendiculares ao eixo de rotação da ferramenta (FERRARESI, 1970; DINIZ et al., 1999). Esta superfície usinada é resultado da ação combinada de gumes na periferia e da face frontal da fresa. Como a superfície é plana, esta não possui relação com o contorno dos dentes e sim pelas raias de usinagem deixadas pelos dentes de acordo com o avanço por volta e por dente (STEMMER, 2008). Na figura 1 pode-se notar a diferença entre os tipos de fresamento.

Figura 1 – Fresamento frontal e tangencial.

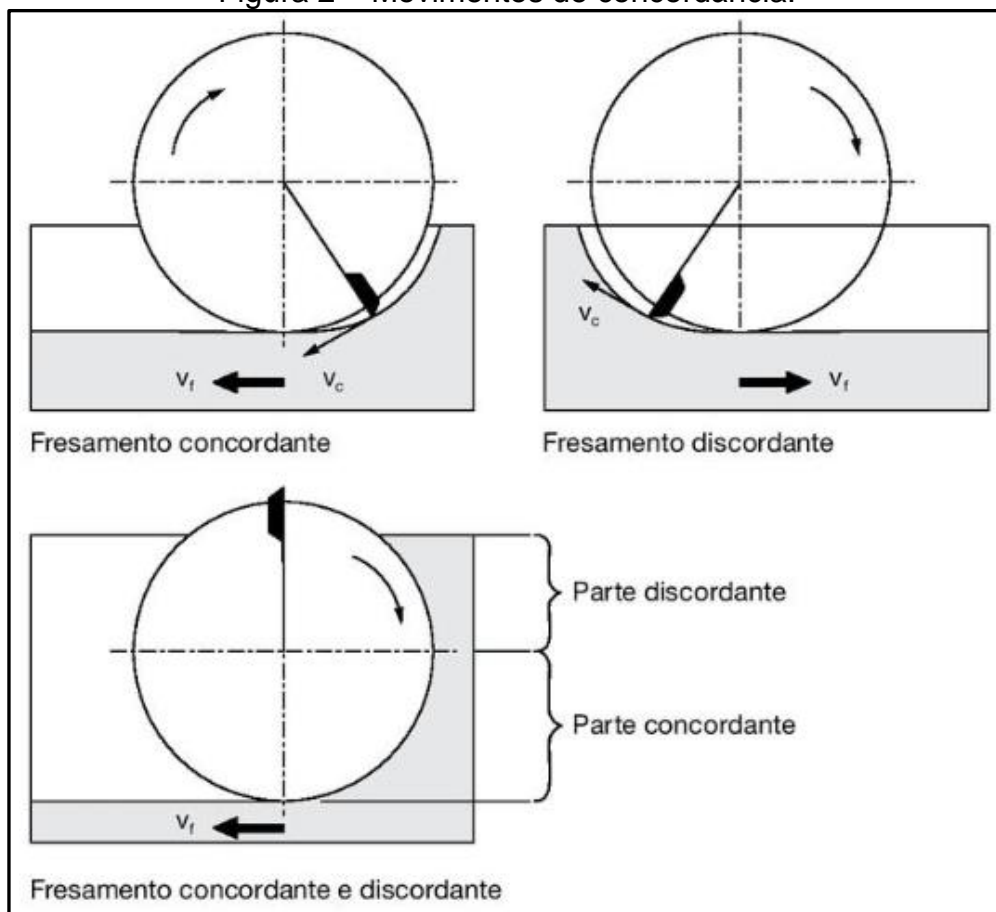


Fonte: Fracaro (2017).

Os fresamentos tangenciais podem variar conforme tipo de concordância do movimento de fresamento entre concordante ou discordante conforme a direção de corte e de avanço da ferramenta (STEMMER, 2008; DINIZ et al., 1999).

O fresamento concordante é definido quando os movimentos de corte da ferramenta e de avanço da peça geralmente tem o mesmo sentido e inicia-se o corte com a espessura máxima do cavaco. Já no fresamento de tipo discordante os movimentos de corte e de avanço geralmente possuem sentidos opostos e inicia-se o corte com a espessura mínima do cavaco. Há outro tipo de movimento chamado de fresamento combinado, onde se obtém simultaneamente fresamento concordante e discordante (STEMMER, 2008; DINIZ et al., 1999). Na figura 2 pode-se verificar os movimentos de concordância possíveis.

Figura 2 – Movimentos de concordância.



Fonte: Fracaro (2017).

2.1.2 Fresamento de topo reto

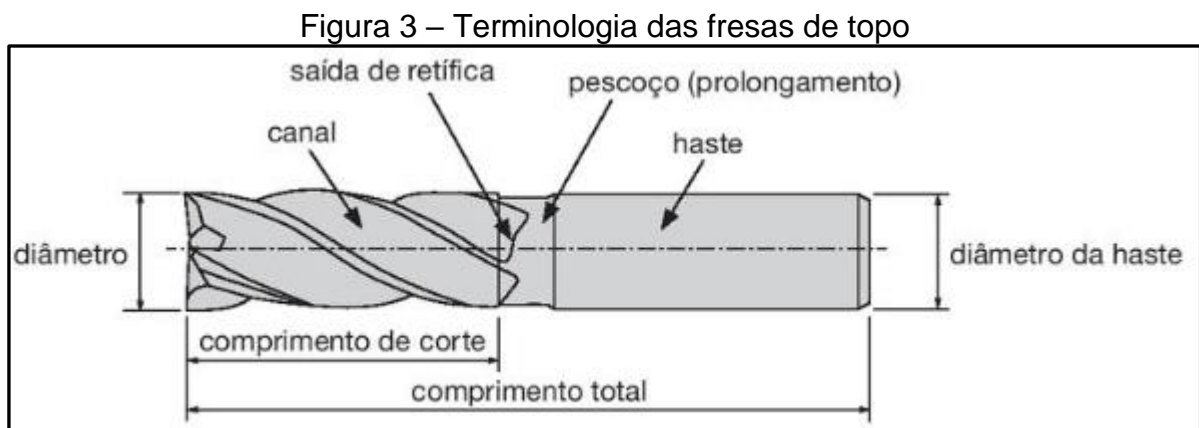
O tipo de fresamento escolhido para desenvolvimento dos testes de temperatura da ferramenta foi o de fresamento de topo reto.

Este tipo de fresa corta tanto na periferia quanto na parte frontal e pode ser utilizado em fresadoras verticais e horizontais, podem variar quanto a direção de corte e de hélice, possuir ranhuras retas e também entre haste cônica ou cilíndrica (STEMMER, 2008). Fresamento de topo é comumente utilizado para rasgos e cortes de todos os tipos e tamanhos e é vantajoso em execuções de superfícies de forma livre (FRACARO, 2017).

Sempre que o corte seja feito simultaneamente na periferia e na parte frontal, as direções de corte e de hélice devem ser iguais, o que proporciona uma saída de cavaco pela parte superior (STEMMER, 2008).

As fresas de topo geralmente são dimensionadas para que a razão entre o comprimento e o diâmetro esteja entre 5 e 10 e dependendo do contato e das condições de avanço essa relação ocasiona em vibrações que poderá aumentar o desgaste via fratura (KLOCKE, 2009).

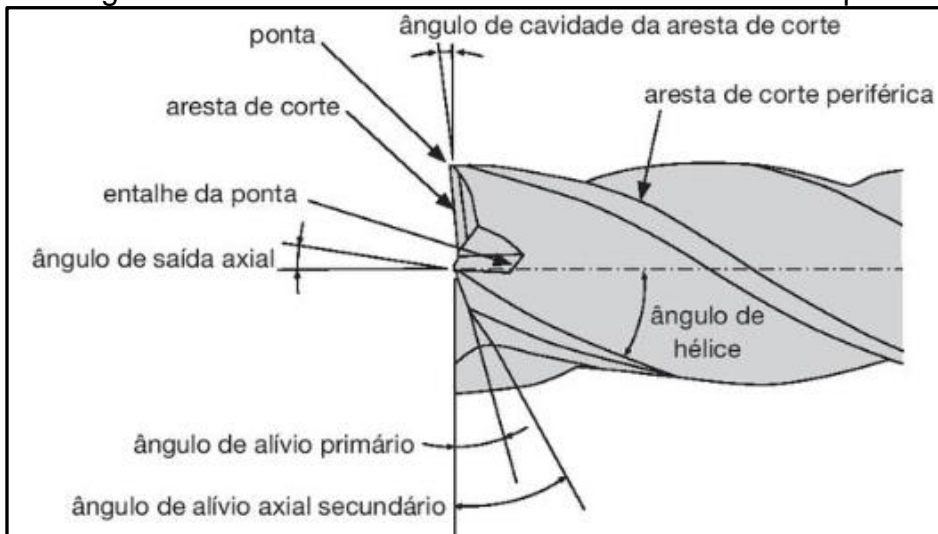
Em cortes frontais e laterais feitos simultaneamente é gerada uma força axial que pode tira-la de seus suportes, portanto a utilização destes tipos de fresas requer uma boa estabilidade e fixação da ferramenta na fresadora para que o comprimento grande em balanço não fique instável (STEMMER, 2008). A terminologia deste tipo de fresa pode ser visualizado conforme figura 3 abaixo.



Fonte: Rebeyka (2016).

A partir da figura 4 é detalhada a aresta de corte periférico e outra aresta de corte na face deste tipo de fresa, além de outros detalhes. Neste tipo de ferramenta o cavaco escoa pelo canal helicoidal. A face frontal executa o acabamento na superfície usinada em direção perpendicular ao eixo de rotação, ao mesmo tempo a outra aresta faz o acabamento nos planos alinhados ao eixo de rotação (REBEYKA, 2016). Na figura 5 mais abaixo pode-se visualizar a variedade de tipos de ponta dessas ferramentas.

Figura 4 – Geometria da extremidade das fresas de topo



Fonte: Rebeyka (2016).

Figura 5 – Exemplos de fresas de topo reto



Fonte: Adaptado de World Tools (2022).

2.1.3 Temperatura no fresamento

Segundo Klocke (2011), durante o processo de fresamento, os gumes não estão constantemente em contato com a peça, existe pelo menos uma interrupção por gume para cada rotação da ferramenta. Estas constantes interrupções alteram as condições de corte, o que torna o fresamento um processo único.

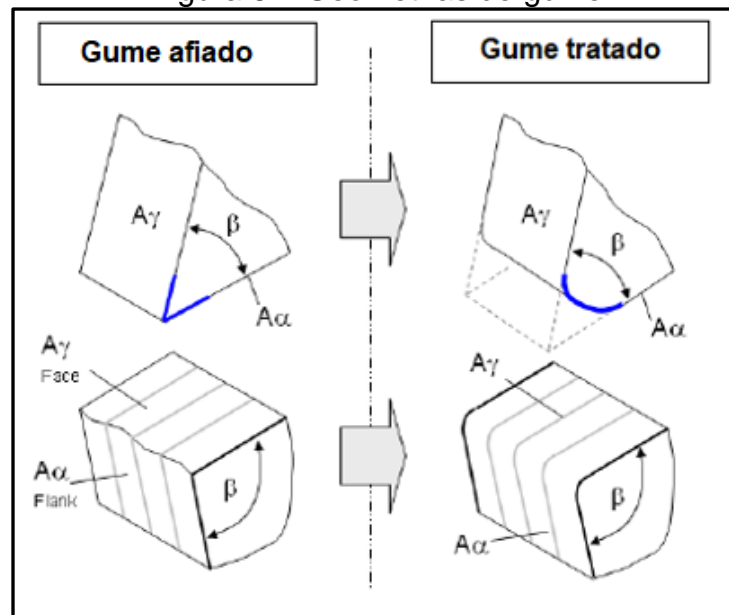
Elevadas temperaturas durante processos de fresamento provocam tensões na região de contato entre ferramenta e peça que ocasionam em distorções e alterações microestruturais que comprometem a integridade superficial da peça e causam desgaste excessivo da ferramenta, o que estimulará um aumento no custo com ferramentas (ÖZEL et al., 2000). Portanto, em processos de fresamento se faz necessário monitorar a temperatura durante a operação de usinagem.

2.1.4 Micro e macro geometrias de gume

A geometria do gume tem uma enorme influência nas forças do processo, na temperatura, na vida útil e na integridade da superfície final (DENKENA et al., 2012). Gumes preparados podem melhorar propriedades fundamentais da cinemática de corte como formação e fluxo de cavaco, forças mecânicas, distribuição de calor e temperatura, desgaste das ferramentas e também a integridade das faces da peça usinada (ZEILMANN e BORDIN, 2014).

Para um bom escoamento do cavaco, faz-se um ângulo entre o gume e a superfície da peça muito pequeno, facilmente visualizado através da figura 6 mais adiante, para que cavacos não sejam formados inicialmente, então o cavaco é escoado para o flanco do gume (KLOCKE, 2009).

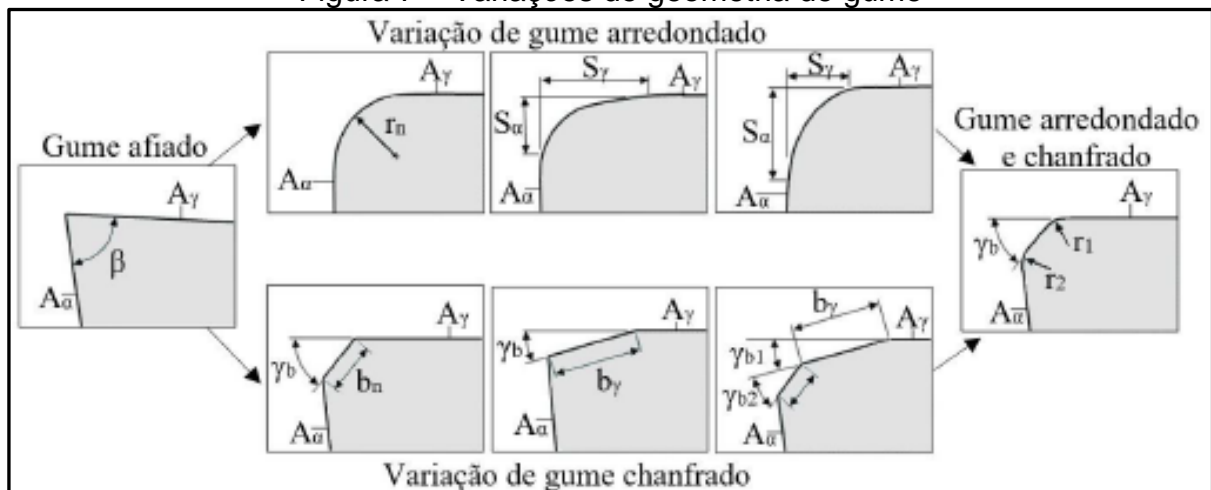
Figura 6 – Geometrias de gume



Fonte: Adaptado de Rodríguez (2009).

As fresas de topo possuem extrema versatilidade, portanto é possível afiar e modificar seu gume com diversas formas geométricas conforme a necessidade da usinagem, assim ilustrado na figura 7 (REBEYKA, 2016). O dimensionamento correto de geometrias de gume da ferramenta pode diminuir os desgastes de flanco e trincas térmicas provenientes das variações de esforços no fresamento (DINIZ et al., 1999).

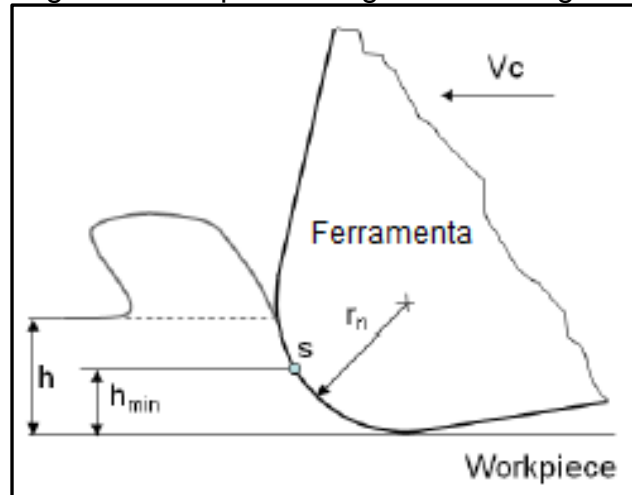
Figura 7 – Variações de geometria de gume



Fonte: Adaptado de Rodríguez (2009).

Segundo Rodríguez (2009), a razão entre o raio do gume (r_n) e a penetração (h), representados na figura 8, pode influenciar diretamente a temperatura interna da ferramenta.

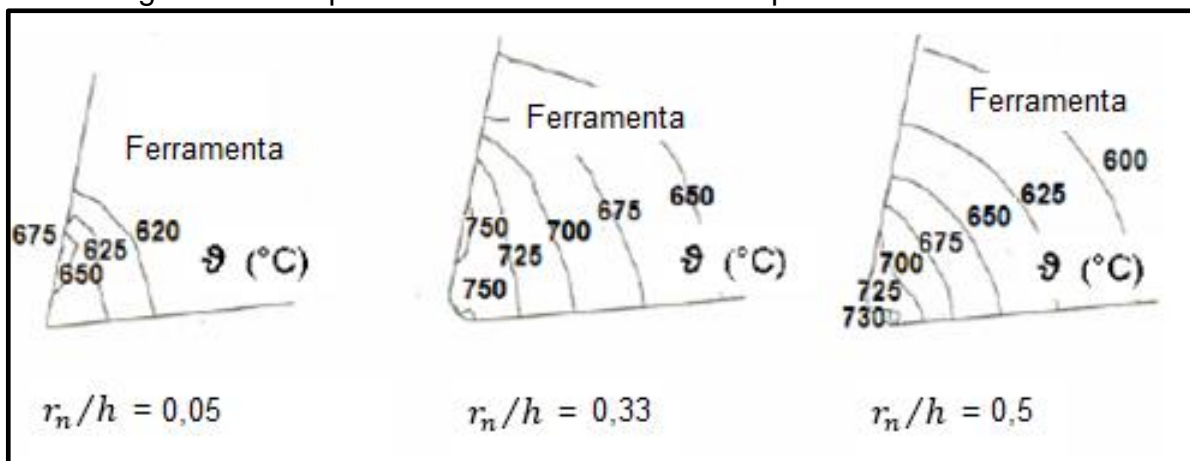
Figura 8 – Esquema de geometria do gume



Fonte: Adaptado de Rodríguez (2009).

Estudos utilizando simulações de elementos finitos concluíram que quando $r_n/h \ll 1$ as maiores temperaturas se encontram na face, com $r_n/h \approx 1$ as maiores temperaturas se encontram no gume de corte e ao $r_n/h \gg 1$ as maiores temperaturas se encontram no flanco, o que é visível na figura 9. Além disso, Rodríguez (2009) concluiu que ao aumentar o r_n , a distribuição da temperatura interna da ferramenta é diretamente impactada.

Figura 9 – Temperatura interna da ferramenta para diferentes razões



Fonte: Kim et al. (1999).

Preparar o gume através de processos de acabamento por arraste pode estabilizar fresas de topo de metal duro e reduzir o desgaste na ferramenta. As forças ativas e as temperaturas entre ferramentas tratadas e não tratadas são aproximadamente a mesma, porém a diferença aumenta gradativamente conforme se aumenta o raio do gume em ferramentas não tratadas em que $r_n = 2,9$ (UHLMANN et al., 2016).

2.2 TRATAMENTO DE FERRAMENTA

A constante necessidade de melhorias na performance de ferramentas e métodos de usinagem faz com que fabricantes desejem as melhores condições possíveis para as ferramentas já padronizadas. Preparar ou tratar o gume é basicamente gerar geometrias de gume controladas, alterar a micro topografia, rugosidade e textura das faces da ferramenta na cunha (ZEILMANN e BORDIN, 2014).

Segundo Rodríguez (2009), o uso de processos de tratamento de gume tem como objetivo eliminar defeitos e irregularidades através da geração de geometria de gumes definidas, modificando a micro topografia do gume e a microestrutura da face e do flanco da ferramenta. É possível também melhorar a vida útil, proporcionar maior confiabilidade no processo, melhorar a qualidade final da peça, aumentar a resistência no gume, minimizar a formação de cavaco e preparar a ferramenta para revestimentos. Alguns dos acabamentos ou tratamentos de gume possíveis estão disponíveis através da figura 10.

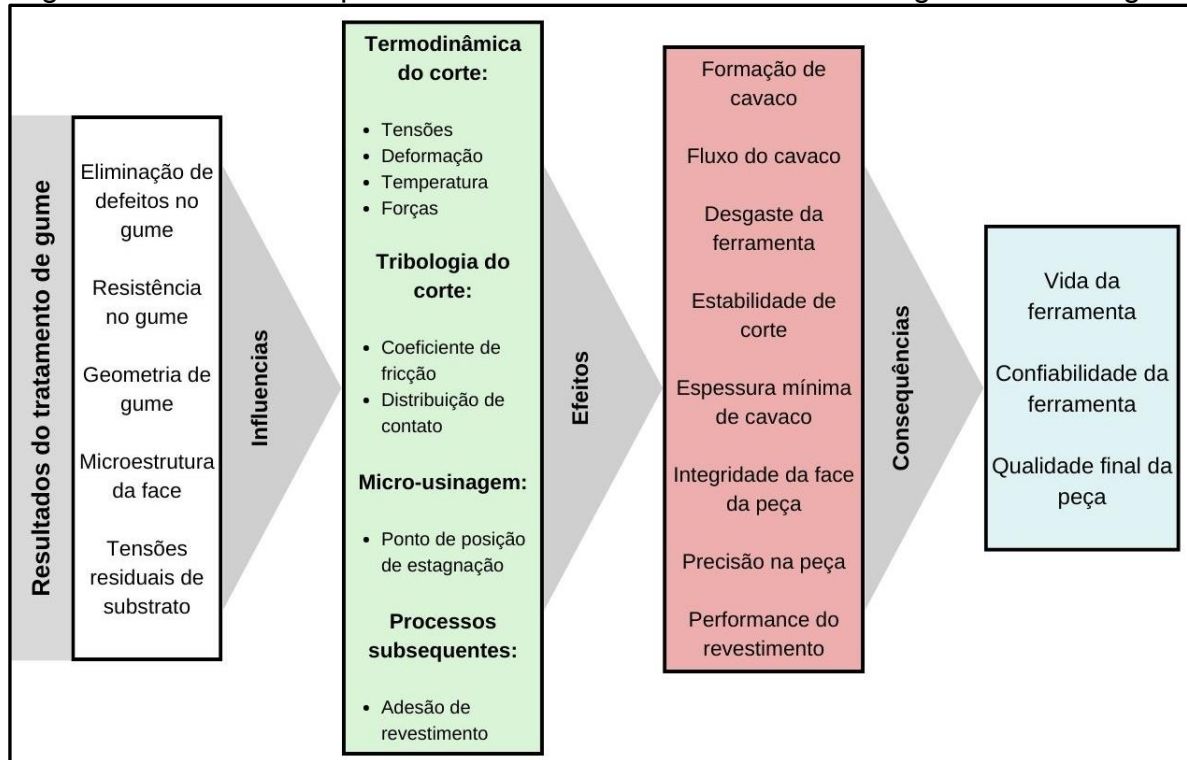
Figura 10 – Processos de acabamento



Fonte: Ost (2016).

O tratamento do gume Influência diretamente em algumas características no processo de usinagem. São elas; o formato das zonas de deformação, distribuição de temperaturas, forças de corte e também a distribuição de tensões (RODRÍGUEZ, 2009). Os impactos e consequências relacionados ao tratamento do gume podem ser compreendidos pela figura 11.

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



Fonte: Adaptado de Rodríguez (2009).

Ao observar e analisar os impactos do tratamento de gume é possível concluir que a utilização de algum tipo de tratamento ou acabamento de gume da ferramenta é imprescindível para obtenção de melhores resultados nos processos de usinagem e consequentemente aumentar e qualificar a produção. Portanto é constantemente estudado e analisado por diversos autores, como por exemplo, Rodríguez (2009), Zeilmann e Bordin (2014), Denkena et al. (2012), Denkena e Biermann (2014), Uhlmann et al. (2016) e Ost (2016).

2.2.1 Polimento de ferramenta

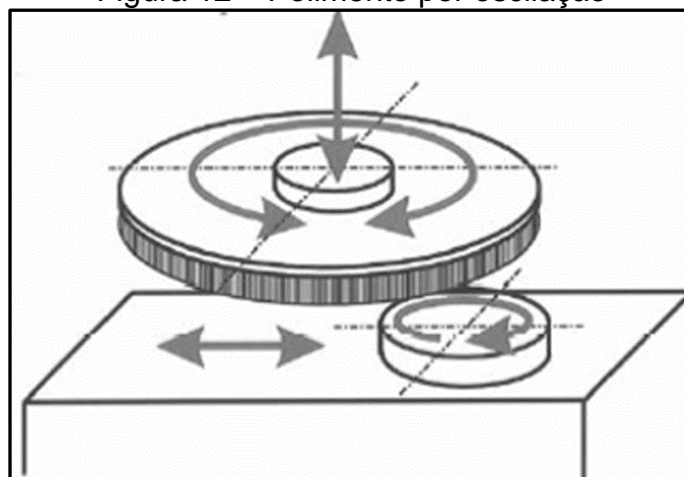
Originalmente o polimento foi desenvolvido para elementos óticos, devido a sua importância para diversas áreas da ciência, inúmeros cientistas estudaram os mecanismos de polimento. A remoção de material dá-se através de mecanismos mecânicos e químicos (KLOCKE, 2009).

Este tipo de polimento pode reduzir rugosidades e melhorar escoamento de cavacos durante posterior usinagem pela ferramenta. Além de ter capacidade de produzir micro geometrias com raios entre 0,005 a 0,15 mm. Este método pode ser utilizado para diferentes ferramentas e diversas geometrias de gume sem que o resultado final seja afetado (TIKAL, 2009, apud OST, 2016).

O método de polimento por escovamento utiliza uma escova macia com cerdas naturais e uma pasta de partículas de diamante para remover material da ferramenta por abrasão (RODRÍGUEZ, 2009). As tecnologias de polimento por escovas abrasivas são de fácil controle e se utilizadas na faixa de μ este processo requer baixo investimento e respeita o meio ambiente. Além disso os resultados são confiáveis e facilmente reproduzíveis (TIKAL, 2009).

Um dos métodos disponíveis para executar este polimento é o por meio de oscilação, conforme ilustrado na figura 12, as ferramentas são polidas pelo movimento rotacional da escova que proporciona o arredondamento do contorno externo da aresta. Este movimento oscilante faz com que a escova desgaste a ferramenta e ao alterar o sentido de rotação da escova pode-se evitar a perda de tensão das cerdas (TIKAL, 2009). – SUBSTITUIR PELO POLIMENTO DE ARRASTE?

Figura 12 – Polimento por oscilação



Fonte: Tikal (2009).

Zeilmann e Bordin (2014) ao estudarem ferramentas afiadas, tratadas por arraste e por polimento em processo de furação à seco, observaram que os menores valores de temperaturas vieram de ferramentas polidas, ferramentas tratadas com polimento obtiveram pequenas reduções na espessura de face quando comparadas aos outros acabamentos. Polimento este que foi feito através de uma esponja composta por filamentos abrasivos fixada em um esmeril pneumático e manual, o que promoveu o polimento da superfície crua da ferramenta.

Tendo em vista estes resultados obtidos por Zeilmann e Bordin (2014) e também os conhecimentos do Tikal (2009), para este estudo escolheu-se o polimento por arraste por tratar-se de um tratamento eficaz, de qualidade e já utilizado previamente pelo grupo de usinagem (GUS) desta universidade.

2.3 TEMPERATURA DA FERRAMENTA

Na usinagem, o calor é gerado pelo trabalho executado pela deformação plástica da peça de trabalho. Ferramentas são desgastadas mais rapidamente conforme a temperatura na interface aumenta (TRENT, 1988; FERRARESI, 1970; DINIZ et al., 1999). O estudo dos efeitos térmicos no processo de usinagem pode melhorar as condições de corte (BARRIOS, 2013; FERRARESI, 1970).

Velocidade de corte, avanço, profundidade e penetração na usinagem são parâmetros que alteram diretamente o comportamento da temperatura, esta que é responsável pelas propriedades mecânicas do material da peça e da ferramenta, a qual é desgastada rapidamente em temperaturas altas, o que conseqüentemente pode reduzir sua vida útil (LIMA, 2017).

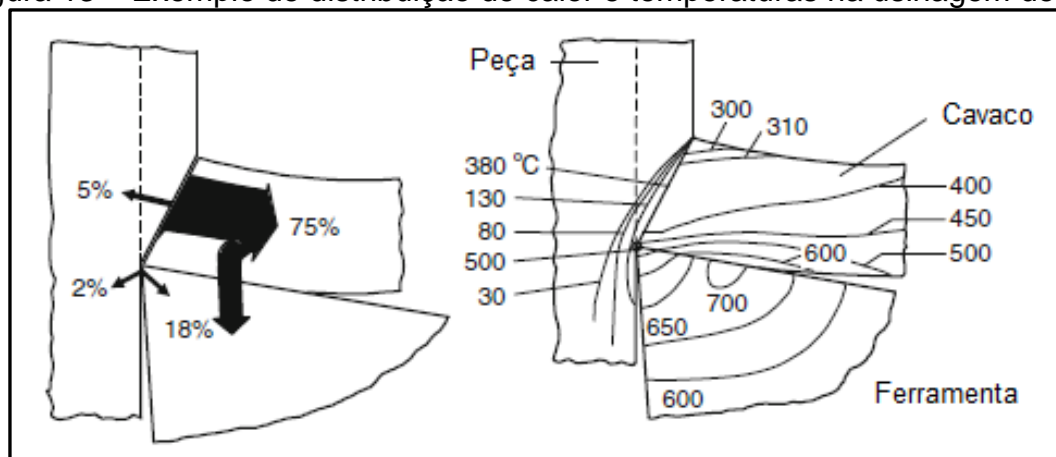
Tendo em vista estas constatações, pode-se dizer que a análise térmica de ferramentas contribui diretamente para o desenvolvimento de novas ferramentas e a determinação de suas vidas úteis, portanto quaisquer ações que possam diminuir os valores de temperatura durante os processos irão conseqüentemente aumentar a vida útil e diminuir o desgaste sofridos. Estudar a temperatura também ajuda a compreender as melhores utilizações dos diferentes tipos de ferramentas para os diversos processos existentes.

2.3.1 Balanço energético

As principais fontes de calor do processo de corte são a deformação plástica do cavaco na região de cisalhamento, atrito entre cavaco e interface de saída da ferramenta e atrito de peça e superfície de incidência da ferramenta (FERRARESI, 1970; DINIZ et al. 1999). As proporções de calores gerados por cada uma das fontes citadas variam de acordo com o tipo de usinagem, material de peça e de ferramenta, as condições de usinagem e a forma da ferramenta. Porém, é possível assumir que a deformação e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento é fonte mais influente sob a geração de calor do processo (DINIZ et al. 1999).

Grande parte do calor gerado pelo corte é dissipado pelo cavaco. Porém uma parcela pequena retorna a peça e outro fator é direcionado para a ferramenta na interface cavaco-ferramenta e na região próxima do gume da ferramenta onde é feito o corte, nestas regiões da ferramenta são encontradas as maiores temperaturas da cinemática de corte, conforme ilustração direita da figura 13 (KLOCKE, 2011). As temperaturas na ferramenta são regidas pela geração de calor nessas regiões deformadas pelo corte da interface ferramenta-peça (TRENT, 1988).

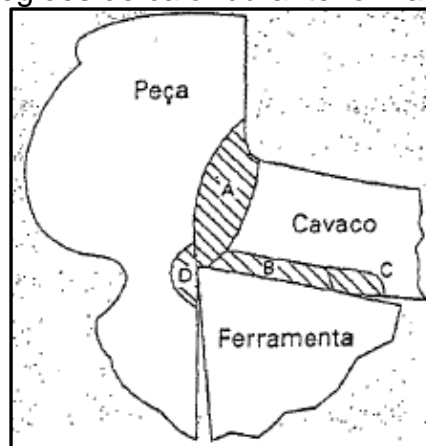
Figura 13 – Exemplo de distribuição de calor e temperaturas na usinagem de aço



Fonte: Adaptado de Klocke (2011).

Segundo Machado et al. (2009) e conforme figura 14, o calor na zona primária de cisalhamento (região A) é resultado do trabalho cisalhante interno do material, já o calor proveniente da interface cavaco-ferramenta (região B e C) e da interface de contato de peça com superfície de folga de ferramenta (região D) é referente ao atrito e ao cisalhamento interno da aderência das superfícies.

Figura 14 – Regiões de calor durante formação de cavacos



Fonte: Machado et al. (2009).

O calor nas regiões A e B é benéfico para o corte pois aumentando a temperatura na zona primária e secundária, a resistência mecânica da peça é diminuída e assim a deformação plástica é facilitada. Nas regiões B e C, o calor influencia diretamente sobre o desempenho da ferramenta e pode limitar a taxa de remoção de material, especialmente ao aumentar a velocidade de corte. A zona C pode contribuir diretamente no aumento da temperatura da peça e da ferramenta e aumenta conforme velocidade de corte (MACHADO et al., 2009).

Conforme Trent (1988), na interface cavaco-superfície de saída da ferramenta existe uma região de aderência e uma de escorregamento entre cavaco e ferramenta. Sendo assim, o cavaco na zona de aderência é movimentado por cisalhamento de seu próprio material. O tamanho da zona de aderência é maior conforme maiores comprimentos de contato cavaco-superfície de saída da ferramenta que é uma consequência de menores ângulos de saída. Quanto maior a zona de aderência, maior a temperatura de corte e a força de usinagem necessária (DINIZ et al. 1999).

Logo ao lado da zona de aderência está a zona de escorregamento, o contato nesta região se dá por picos de irregularidades das superfícies em contato e conseqüentemente, picos de temperaturas por pequenos períodos de tempo. Algumas observações sobre esta região sugerem que as temperaturas na interface desta zona são menores do que na região de aderência, especialmente em altas velocidades de corte (TRENT, 1988; DINIZ et al. 1999).

Ainda próximo à interface há também uma zona de fluxo com espessuras entre 0,01 mm e 0,08 mm, onde existe uma camada de material estacionário na interface cavaco-ferramenta. A velocidade de saída do cavaco aumenta conforme percorre a espessura até alcançar o fim desta zona, onde se torna constante e se encerra o cisalhamento (DINIZ et al. 1999).

O calor é intensificado na parte inferior do cavaco e no flanco da ferramenta, pois a energia necessária para superar a fricção entre cavaco e flanco é praticamente inteiramente convertida em calor. Os valores das temperaturas atuantes na seção de corte dependem do material a ser usinado e da ferramenta, condições de corte e meio de resfriamento (KLOCKE, 2011). A quantidade de calor gerada depende diretamente das condições da usinagem, principalmente da velocidade de corte, que gera calor no processo (LIMA, 2017).

Da mesma maneira que a temperatura depende diretamente de alguns bem como parâmetros do processo, condições na interface de aderência ou de escorregamento, dependem da velocidade de corte e do tempo de usinagem. Condições de aderência são favorecidas em altas velocidades de corte, longos tempos de usinagem e pequenas diferenças entre material de peça e ferramenta (WRIGHT, 1979 apud DINIZ, 1999).

Na indústria, para amplificar a produtividade do processo a velocidade de corte, avanço ou profundidade de usinagem são aumentados, o que influencia diretamente na temperatura da zona de corte. Portanto, deve ser de suma importância o desenvolvimento de métodos para diminuição de temperatura e também condições de usinagem que gerem equilíbrio entre produtividade e temperatura (DINIZ et al. 1999).

2.3.2 Medições de temperatura da ferramenta

Existem diferentes métodos e equipamentos disponíveis para medições de temperatura durante os processos de corte. Estes que podem variar de acordo com a técnica, configuração experimental e posição de medição (KLOCKE, 2011). O termopar que relaciona ferramenta e processo é a medição mais difundida (TRENT, 1988). Sendo assim, na próxima seção serão detalhados os pontos positivos e negativos de alguns destes métodos.

2.3.2.1 Propostas de medição de temperatura

Foram apresentados três processos de medição de temperatura na seção 2.3.2 deste trabalho, sendo assim foi demonstrado algumas das diversas maneiras existentes e aplicáveis de realizar a medição de temperatura nas ferramentas de corte durante os processos de usinagem. Leonidas et al. (2022), avaliou esta variedade de métodos e obteve como resultado a tabela 1 que detalha as capacidades e as limitações de alguns processos de medição de temperatura.

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

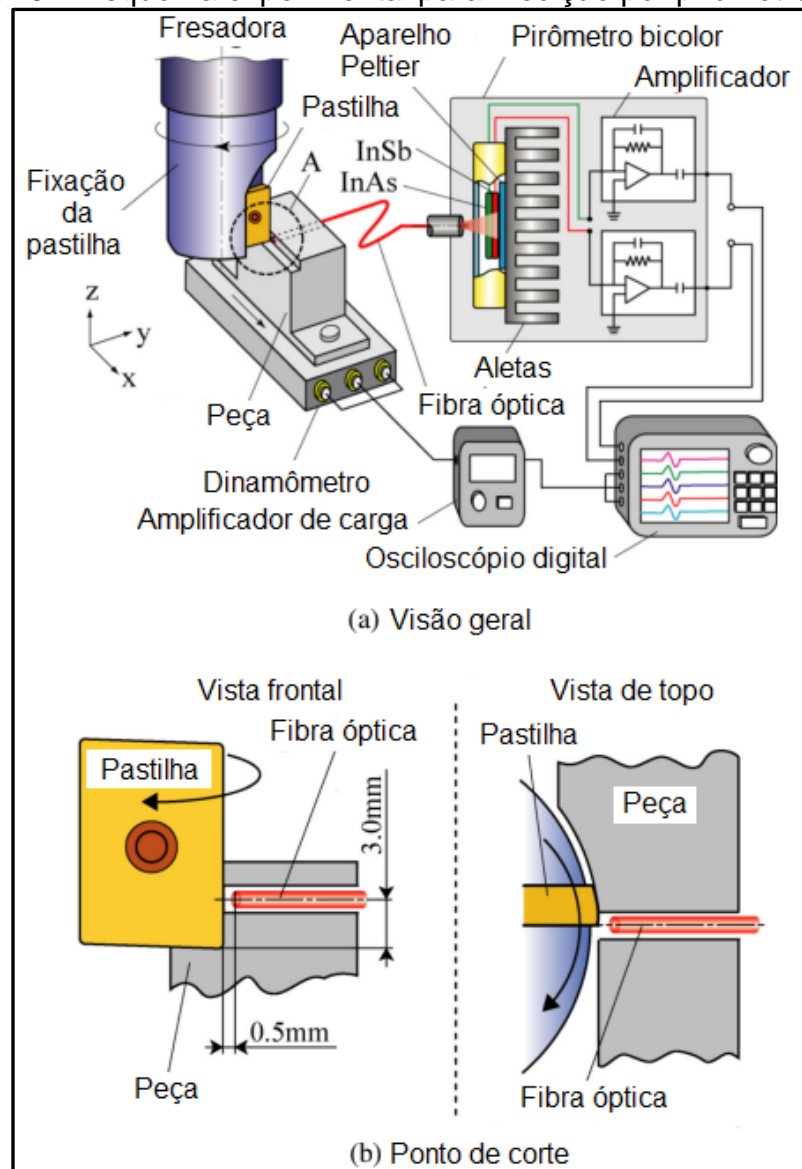
Capacidades e limitações de métodos de medição de temperatura			
Métodos de medição		Capacidades	Limitações
Termopar	Ferramenta-peça	Baixo custo Simples implementação	Não aplicável com lubrificantes Medição média da área de contato
	Embutido	Baixo custo Simples implementação Ideal para distribuição de calor no material da peça	Irreversível Implementação complexa para fresamentos Atraso de medição para bruscas mudanças de temperaturas
	Simples	Trabalhos experimentais em laboratório	Irreversível
Câmera térmica		Medições rápidas Mapa de distribuição de temperatura Não destrutivo	Incertezas de calibração Linha visão direta ininterrupta Não aplicável para lubrificantes
Termômetro infravermelho		Tempo de resposta rápido Não destrutivo Alta precisão	Incertezas de calibração Sensibilidade à temperatura ambiente
Termômetro infravermelho de fibra óptica		Medições rápidas Alta precisão e versatilidade	Irreversível quando embutido Implementação complexa para fresamentos

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

2.3.2.2 Medição por pirômetro de duas cores com fibra ótica

Okada et al. (2014), analisou e mediu a temperatura na face do flanco durante o corte utilizando de um pirômetro bicolor com fibra ótica. Neste método, raios infravermelhos são irradiados da ponta da ferramenta e então são alimentados ao detector de duas cores por fibra ótica. Esta energia infravermelha é então convertida para um sinal elétrico amplificado. Portanto ao tomar a razão entre as tensões das saídas, pode-se obter a temperatura da aresta de corte da ferramenta sem influência de emissividade. Okada et al. (2014), confeccionou um esquema representando o sistema que pode ser visualizado através da figura 15 abaixo.

Figura 15 – Esquema experimental para medição por pirômetro bicolor

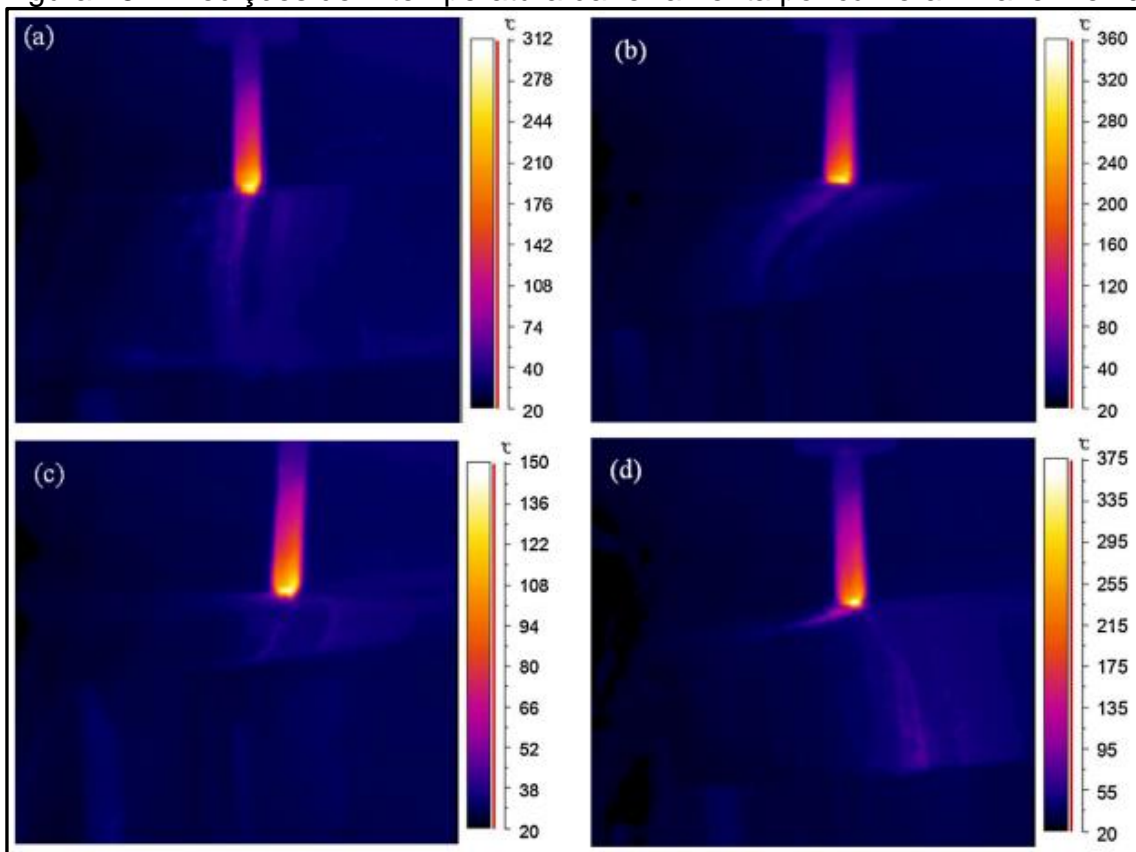


Fonte: Adaptado de Okada et al. (2014).

2.3.2.3 Medição por câmera infra vermelha

Yan et al. (2014), estudou a variação de temperatura de ferramentas revestidas empregadas no fresamento a seco considerando o efeito de desgaste de flanco. Para medir a temperatura durante este processo, utilizou de uma câmera infra vermelha. Após calcular analiticamente quais seriam as temperaturas do processo e realizar as medições durante o experimento, Yan et al. (2014), percebeu que os valores de temperatura foram muito próximos. Logo, concluiu que assumir que parte do calor é absorvido pelos cavacos, o restante ser dissipado pela ferramenta na forma de transferência global é viável. A figura 16 abaixo são as imagens feitas pela câmera utilizada.

Figura 16 – Medições de = temperatura da ferramenta por câmera infravermelha



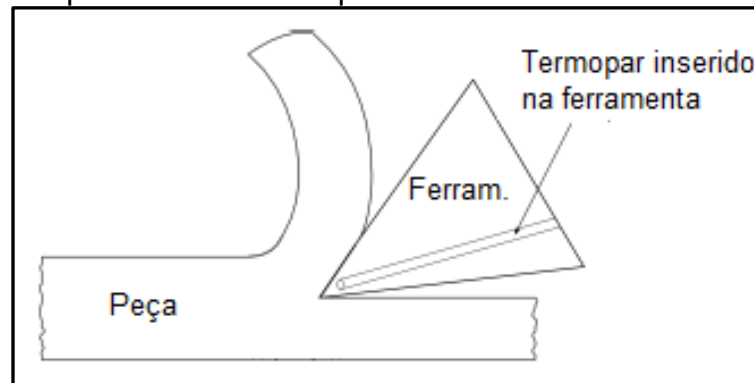
Fonte: Adaptado de Yan et al. (2014).

2.3.2.4 Medição por termopar inserido na ferramenta

A medição da temperatura possui algumas limitações, o maior exemplo é o uso de termopar inserido na ferramenta, as altas rotações da fresa dificultam esta medição (LIMA, 2017).

O método de medição de temperatura por termopar baseia-se no uso de dois materiais dissimilares e condutores que são conectados eletricamente entre si. Partes chamadas de uniões quentes e frias são mantidas a temperaturas diferentes e então uma força eletromotriz (f.e.m) é gerada. O valor desta força depende dos materiais utilizados e também da diferença de temperatura das uniões (TRENT, 1988; LIMA, 2017). É então feito um furo na ferramenta para inserção do termopar, conforme figura 17.

Figura 17 – Esquemático de termopar embutido na ferramenta durante corte

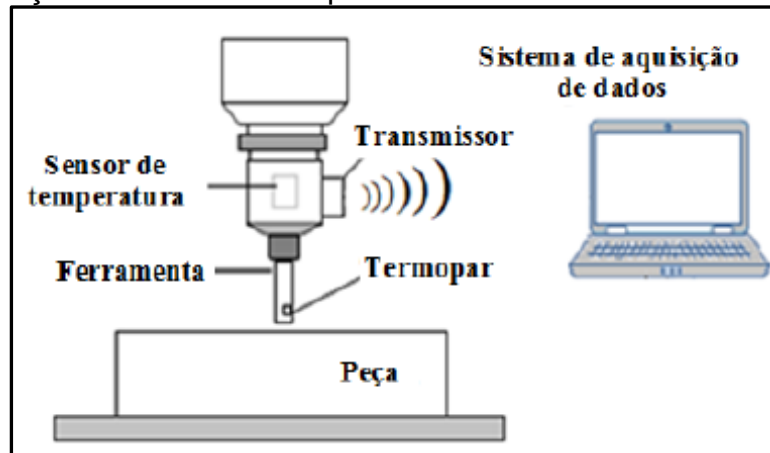


Fonte: Adaptado de Leonidas (2022).

Em razão dos curtos períodos de tempo de contato entre ferramenta e peça durante o fresamento, os tempos de resposta de medição do termopar embutido na fresa pode não ser rápida o suficiente para as temperaturas flutuantes de fresamento em altas velocidades de corte (LEONIDAS et al. 2022).

Em virtude desta dificuldade de aplicação do método de termopares em processos de fresamento, geralmente se insere o termopar na peça, porém através de um sistema de transmissão sem fio de dados para um computador, a inserção na ferramenta também é possível, conforme figura 18 mais adiante. Este tipo de medição possibilita a coleta de dados em usinagens em altas velocidades de corte e também a utilização de fluidos de corte. (LIMA, 2017).

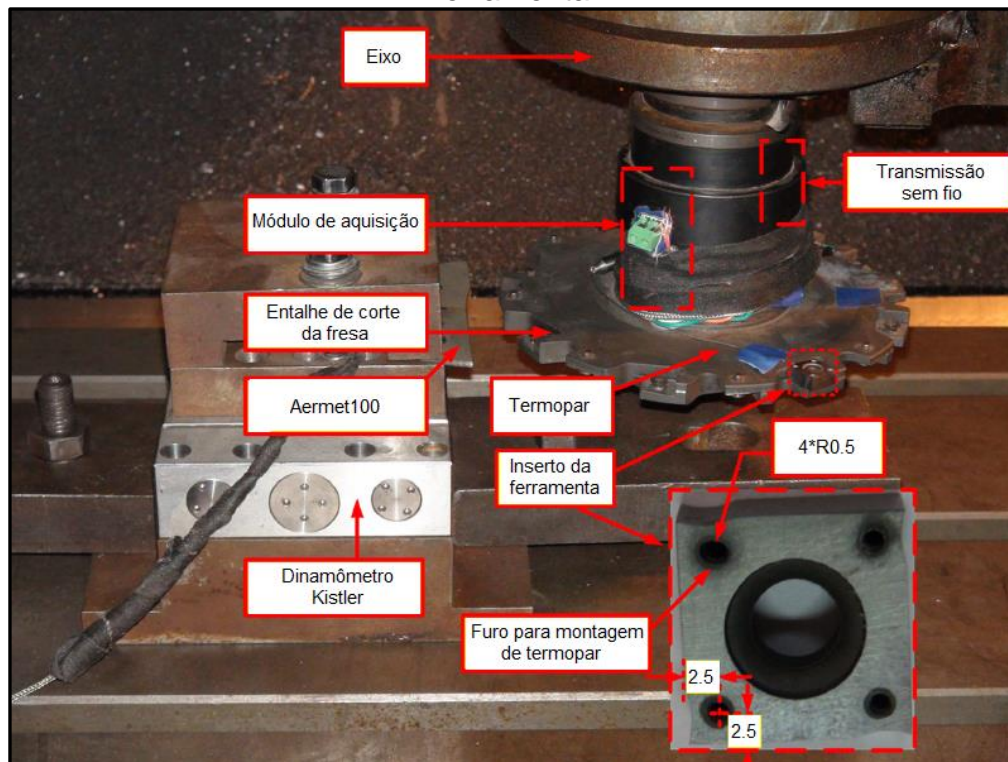
Figura 18 – Medição sem fio de termopar inserido na ferramenta em fresamento



Fonte: Lima (2017).

Jiang (2018), estudou a temperatura da ferramenta em altas velocidades de corte em fresamento de topo utilizando medição sem fio por termopar interno à ferramenta, conforme figura 19. Realizou também comparações dos valores obtidos pelo termopar com cálculos e também os efeitos da convecção, geração e tempo de condução de calor sob a temperatura da ferramenta.

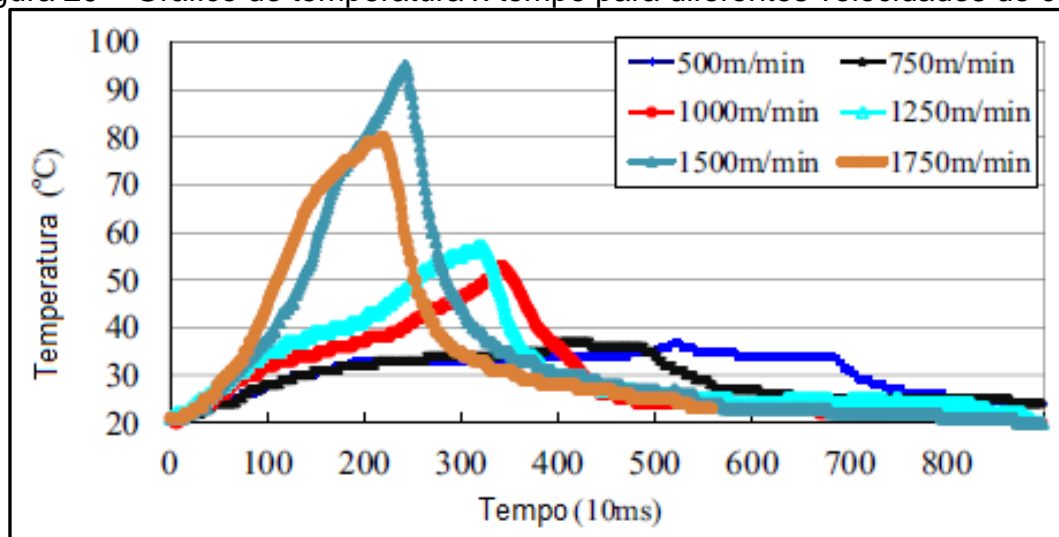
Figura 19 – Configuração experimental de medição sem fio por termopar inserido à ferramenta



Fonte: Adaptado de Jiang (2018).

Jiang (2018), ao utilizar este sistema obteve diversos valores de temperatura para diferentes velocidades de corte, conforme figura 20. Após analisar estes valores, é possível concluir que os efeitos de convecção de calor não podem ser negligenciados em altas temperaturas e que as variações de temperatura na ferramenta em processos de fresamento são uma combinação de tempo de condução, convecção e geração de calor.

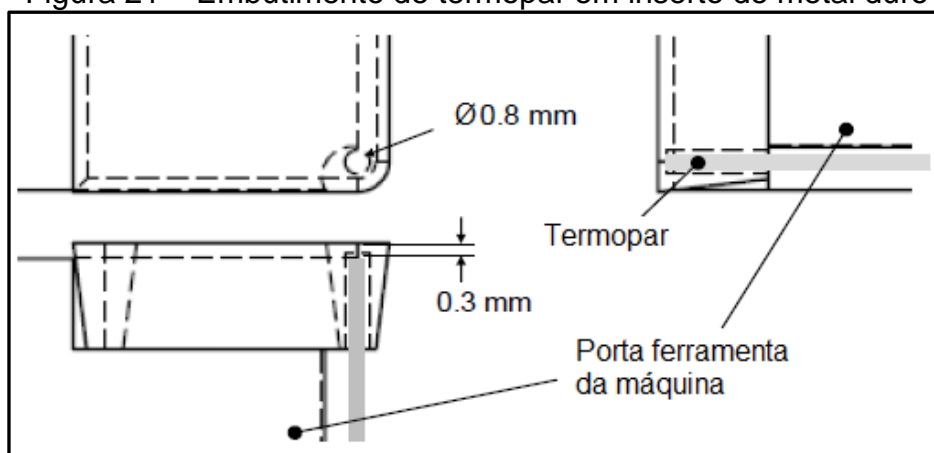
Figura 20 – Gráfico de temperatura x tempo para diferentes velocidades de corte



Fonte: Adaptado de Jiang (2018).

Karaguzel et al. (2016), também empregou embutimento de termopares em insertos de metal duro sem revestimento durante o fresamento do aço ABNT 1050. Para tal, os autores utilizaram um termopar tipo K em um furo de 0,8 mm de diâmetro localizado a 0,3 mm da aresta de corte conforme figura 21 abaixo.

Figura 21 – Embutimento de termopar em inserto de metal duro



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

3 MATERIAIS E MÉTODOS

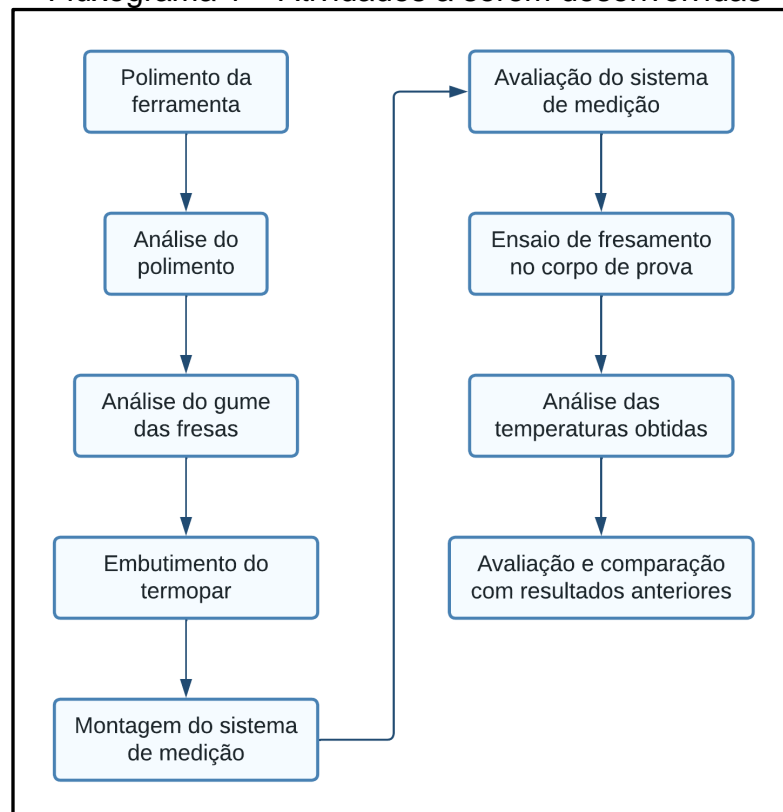
Tendo como inspiração alguns padrões de ensaios já desenvolvidos pelo Grupo de Usinagem (GUS) em parceria com a OTEC, nesta seção serão descritos os materiais, instrumentos e equipamentos a serem manipulados.

3.1 FLUXOGRAMA DE ATIVIDADES

O fluxograma 1 representa as atividades propostas para os ensaios experimentais deste estudo. Inicialmente, será feito o polimento da ferramenta no laboratório da universidade. Logo após, será desenvolvida uma avaliação do tratamento e da integridade dos gumes. Posteriormente à avaliação deve-se realizar o embutimento dos termopares e preparação completa do sistema de medição.

Em seguida serão realizados os ensaios de fresamento no corpo de prova utilizando as fresas polidas e não polidas, posteriormente as temperaturas obtidas pelo sistema de medição do termopar serão analisadas e então comparadas com resultados de estudos similares.

Fluxograma 1 – Atividades a serem desenvolvidas



Fonte: O autor (2023).

3.2 INSTRUMENTAÇÃO

Para a realização de todos os processos e métodos desenvolvidos neste trabalho foram utilizados somente equipamentos localizados nos laboratórios da Universidade de Caxias do Sul. Portanto, nesta seção estes serão apresentados e descritos.

3.2.1 Parâmetros de operação

Para os ensaios de usinagem a serem realizados por este trabalho serão inseridos ao centro de usinagem os parâmetros de corte representados na tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de corte

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

Fonte: O autor (2023).

3.2.2 Ferramenta

A realização de todos os ensaios será feita com fresas de metal duro de topo de 20 mm de diâmetro com quatro arestas de corte, sem revestimento, tratadas e não tratadas. Além disso, a fresa possui os ângulos apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Ângulos da fresa de topo

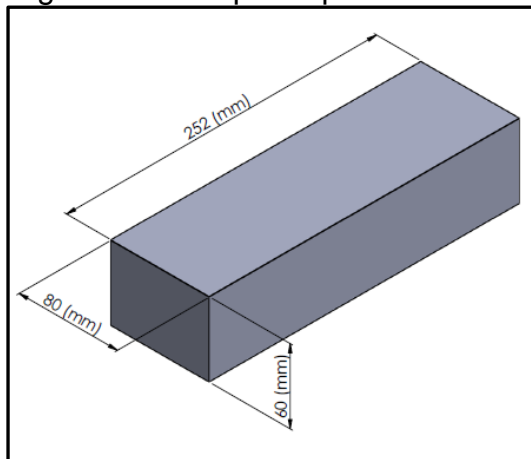
Ângulos de fresa		
Ângulos	Valor	Unidade
Ângulo de Folga (α)	10°	graus
Ângulo de Cunha (β)	72°	
Ângulo de Saída (γ)	8°	
Ângulo de Hélice (λ)	30°	

Fonte: Secta Tools (2021).

3.2.3 Corpo de prova

O corpo de prova a ser usinado durante os ensaios experimentais de fresamento é constituído de aço AISI P20 ($42CrMo_7$) com dureza de 36 HRC. O corpo de prova será esquadrejado e suas faces retificadas, atingindo dimensões de 252 x 80 x 60 mm, conforme figura 22.

Figura 22 – Corpo de prova AISI P20



Fonte: PPGMEC (2021).

3.2.4 Equipamentos

3.2.4.1 Centro de usinagem

Os ensaios serão executados no Laboratório de Usinagem da Universidade de Caxias do Sul. Tais testes de fresamento serão executados por meio do centro de usinagem LG-500 (comando Mitsubishi), da Hartford, com rotação máxima de 10.000 *rpm* e potência de 10 *kW*, representado na figura 23.

Figura 23 – Centro de usinagem Hartford LG-500



Fonte: O autor (2023).

3.2.4.2 Polimento da ferramenta

Para o tratamento do gume será utilizado o método de polimento por arraste, o qual consiste em rotacionar a ferramenta em imersão de uma mídia abrasiva, conforme figura 24, então após certo tempo deste arraste, as ferramentas estão com seus gumes devidamente tratados.

Para este trabalho as ferramentas foram submersas cerca de 23 *mm* durante 10 *min* a 40 *rpm* nas mídias da empresa alemã OTEC, a HSC 1/300 composta por alumínio e casca de noz e também a H 4/400 constituída de grãos de casca de noz e pó de diamante.

Figura 24 – Polimento da ferramenta por arraste



Fonte: O autor (2023).

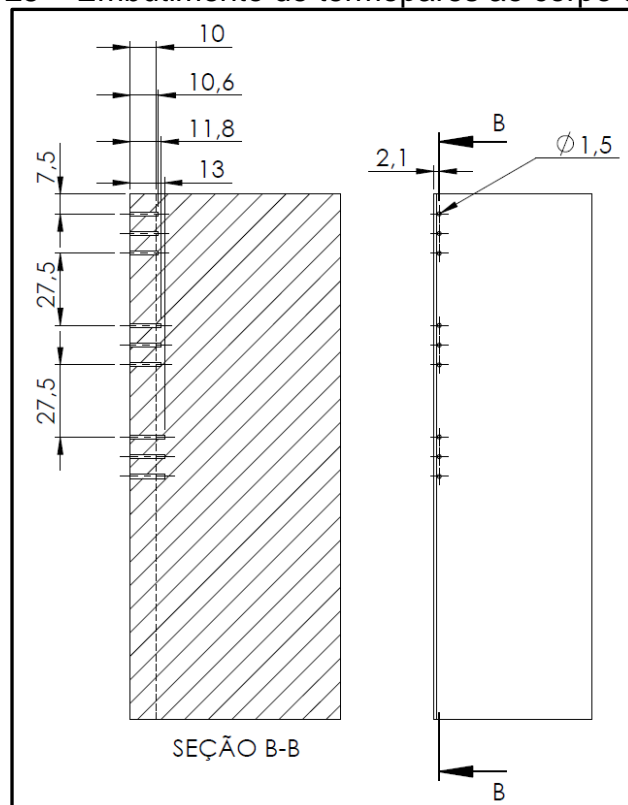
3.2.5 Embutimento de termopares ao corpo de prova

Assim como o embutimento anterior, para este processo serão utilizados furos de 1,5 mm de diâmetro. Para maior amostragem de dados serão desenvolvidas 9 unidades destas perfurações aos corpos de prova em intervalos de 3 unidades somando um total de 27 furos em 2 corpos de prova a serem usinados.

Devido ao baixo valor de a_e e a pequena quantidade de passes, será utilizado um desbaste de 10 mm na face inicial do corpo para que os termopares embutidos possam ser fixados ao corpo de prova.

Afim de analisar possíveis variações de temperatura conforme os passes são realizados, serão utilizadas diferentes profundidades para cada conjunto. As profundidades foram definidas para que estejam centralizadas entre cada intervalo de 3 passes de a_e por conjunto de termopar. Todos os passes possuem movimento concordante de corte e percorrem toda a peça e retornam à posição inicial. Todos os furos estão situados à 2,1 mm da face superior da peça, o que gera uma folga de 0,3 mm entre a parede interna do furo do termopar e a face pós usinada do corpo de prova, para melhor compreensão consultar figura 25.

Figura 25 – Embutimento de termopares ao corpo de prova



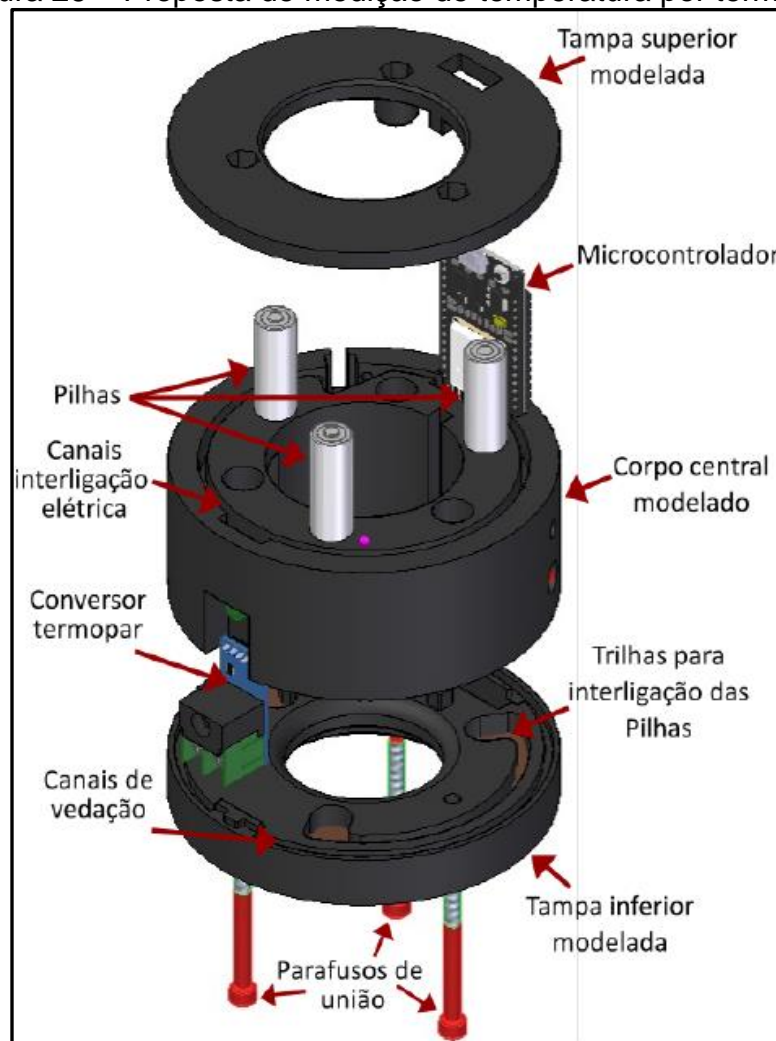
Fonte: O autor (2023).

3.2.6 Medição de temperatura por termopar inserido na ferramenta

A técnica de embutimento de termopares para medição é comumente utilizada em estudos e laboratórios devido a seu relativo baixo custo e simples implementação. Porém a implementação de embutimento de termopar em fresas é consideravelmente complexo (LEONIDAS et al. 2022).

Portanto, considerando as informações dispostas anteriormente, neste estudo serão empregados termopares inseridos na ferramenta e na peça, para devida comparação térmica entre estes métodos. O embutimento à ferramenta é um desafio a ser superado por este estudo. O sistema a ser utilizado para aquisição dos dados de temperatura da ferramenta foi desenvolvido por Schmitt e Adamatti (2022) no programa de estágio desta instituição e está expressado na figura 26.

Figura 26 – Proposta de medição de temperatura por termopar



Fonte: Schmitt e Adamatti (2022).

3.2.7 Medição de temperatura por termopar inserido na peça

Para aquisição de dados para os termopares inseridos no corpo de prova foi utilizado o módulo para aquisição de termopares QuantumX MX1609KB, em destaque na figura 27, o qual mede temperaturas precisamente com uma exatidão de até $\pm 0,5$ K. Seu tempo de resposta extremamente curto o torna ideal para tarefas dinâmicas de medição em pesquisa e desenvolvimento. Possuindo 16 conectores eletricamente isolados e escaláveis livremente, o QuantumX MX1609KB adquire uma imagem multidimensional da configuração do trabalho.

Figura 27 – Módulo de aquisição de termopares QuantumX MAX1609KB



Fonte: HBM (2023).

O Quantum MX1609KB é adequado para termopares tipo K, para medir temperaturas entre -100 e $+1300^{\circ}\text{C}$. A série Quantum MX1609 oferece alta qualidade com excelente relação custo e benefício. O módulo é dotado de uma interface que permite a visualização em tempo real das medições realizadas, conforme figura 28.

Figura 28 – Interface para análise de dados



Fonte: HBM (2023).

3.2.8 Embutimento de termopar às ferramentas

Para este procedimento do trabalho foi necessária a utilização do equipamento de eletroerosão ENGEMAQ EDM 440 NC do laboratório da Universidade de Caxias do Sul para furação das fresas conforme figura 29, serão desenvolvidos dois furos de 2 *mm* de diâmetro às ferramentas e, a fim de garantir a integridade estrutural do gume, as fresas serão perfuradas 10,3 *mm* o que deixaria cerca de 0,3 *mm* de folga até o gume, para tal operação será necessário o desenvolvimento de um gabarito para posicionamento no equipamento e segurança da repetitividade do processo.

Figura 29 – Equipamento EDM 440 NC



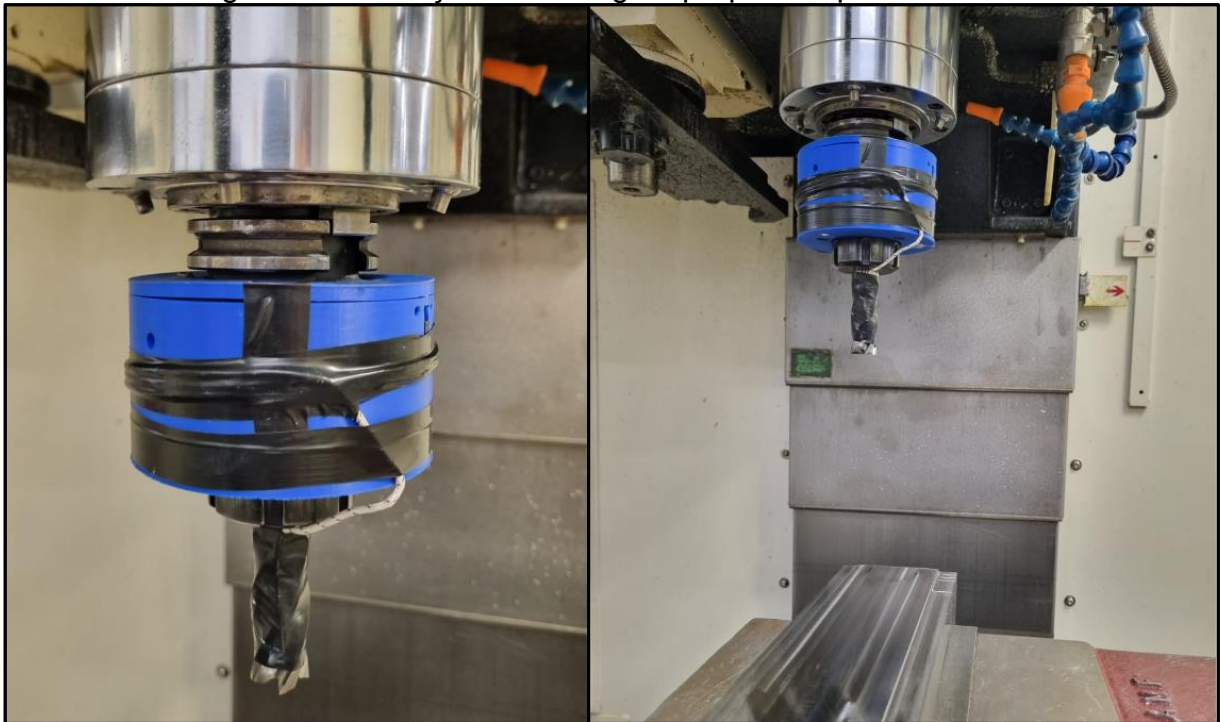
Fonte: O autor (2023).

3.3 PREPARAÇÃO PARA USINAGEM

Após a conclusão dos embutimentos e também do tratamento do gume da ferramenta. Deve-se então adicionar o conjunto de medição do termopar embutido, o qual foi previamente montado, à porta pinça do centro de usinagem e logo após fixar a primeira ferramenta a ser testada.

A seguir posicionou-se o corpo de prova na estação de trabalho juntamente com seu sistema de medição de termopares previamente configurados. Ambas situações de montagem podem ser facilmente visualizadas através da figura 30 abaixo. Todos os sistemas de medições foram testados anteriormente aos ensaios analisados neste trabalho.

Figura 30 – Estação de usinagem preparada para ensaios



Fonte: O autor (2023).

4 RESULTADOS

O capítulo atual tem como finalidade, apresentar os trabalhos de preparação desenvolvidos, resultados conquistados dos ensaios de fresamento e demonstrar a efetividade do polimento de ferramentas comparativamente às diferentes avaliações térmicas do processo.

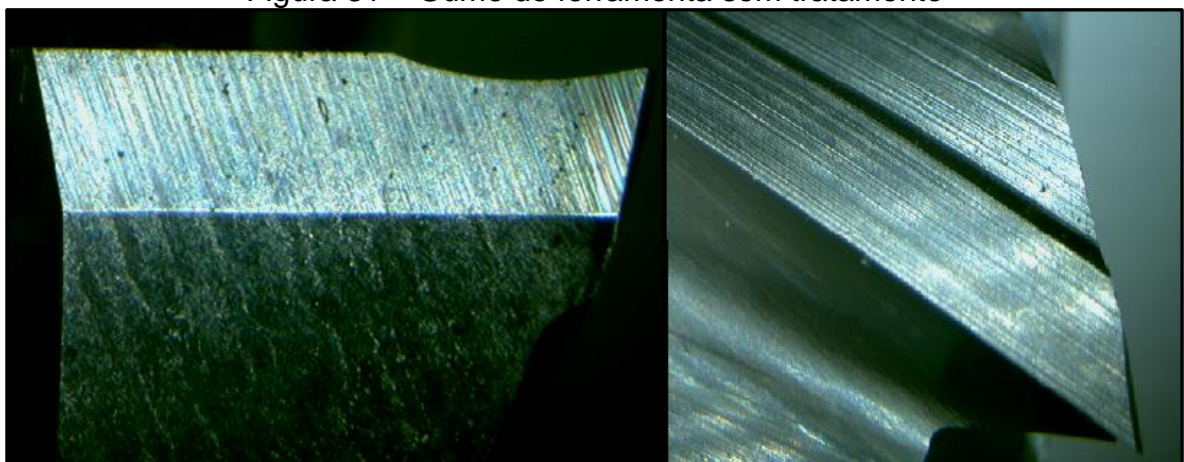
4.1 ANÁLISES DAS FERRAMENTAS

4.1.1 Avaliação de integridade dos gumes

A primeira etapa de todos os procedimentos práticos deste trabalho é a avaliação de integridade dos gumes das ferramentas a serem utilizadas nos ensaios, os quais serão apresentados em forma de imagem afim de comprovar a total integridade pré testes, pois se alguma ferramenta apresentasse avarias, esta não poderia ser utilizada nos testes devido a possíveis divergências nos valores de temperatura entre uma fresa já desgastada e uma íntegra.

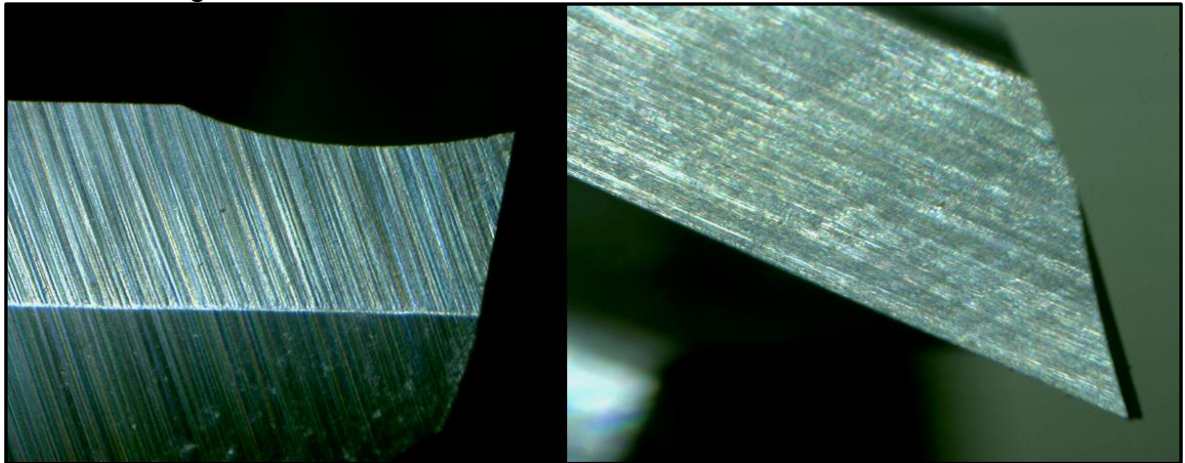
Para captação de imagens dos gumes conforme figuras 31, 32 e 33 mais adiante. A sequência de imagens apresentada é composta por 6 imagens no total, somente para fins de representação, foi escolhido 1 gume por ferramenta e então adquiridas 2 imagens, uma vista de topo e uma vista lateral.

Figura 31 – Gume de ferramenta sem tratamento



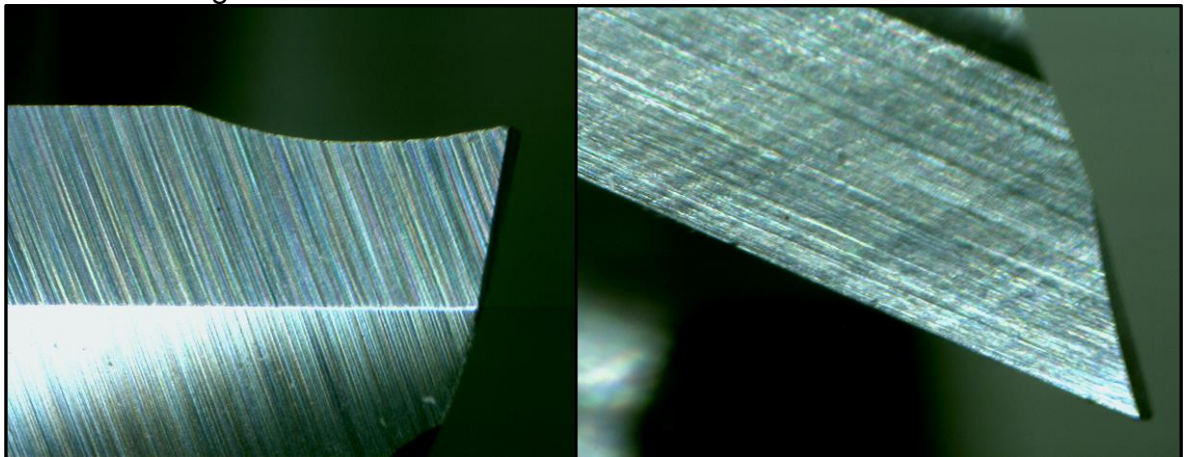
Fonte: O autor (2023).

Figura 32 – Gume de ferramenta com arraste em HSC 1/300



Fonte: O autor (2023).

Figura 33 – Gume de ferramenta com arraste em H 4/400



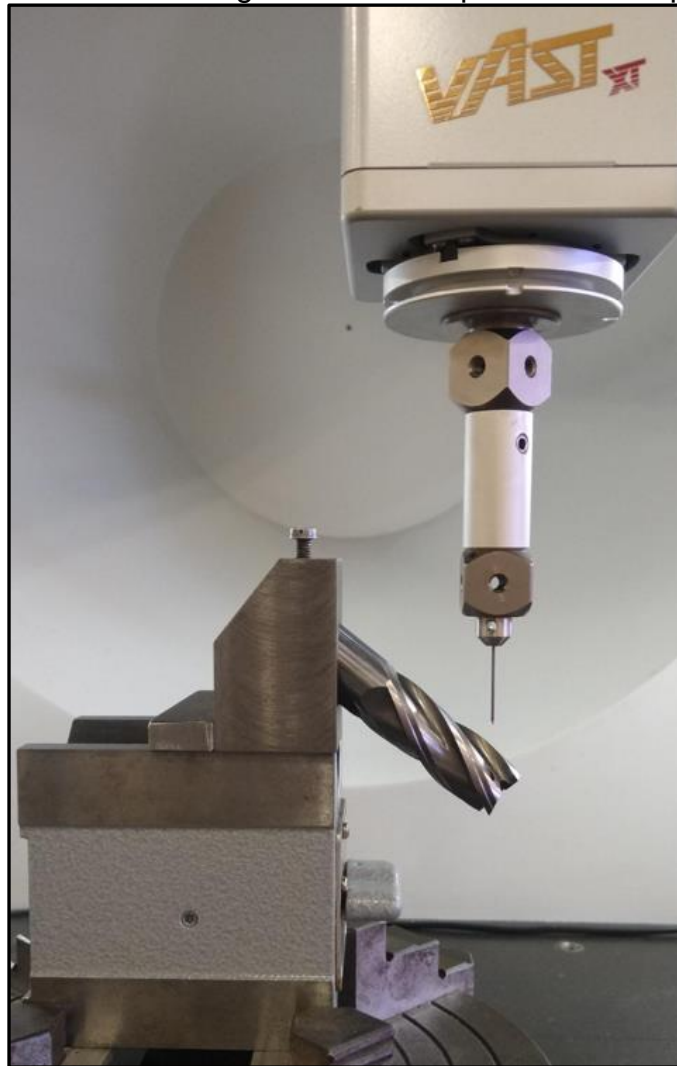
Fonte: O autor (2023).

Após análises visuais de todos os gumes, concluiu-se que todos estavam com sua integridade preservada, sendo assim foi dada continuidade na utilização destas fresas.

4.1.2 Comparativo entre modelo real e modelo 3D da fresa

Para o estudo desenvolvido deve-se atentar minuciosamente aos detalhes e qualquer pequena diferença entre o planejado e o executado pode retardar alguns processos práticos, acontecer avarias e conseqüentemente afetar diretamente a eficácia dos dados adquiridos. Portanto, afim de garantir que não haja nenhuma divergência entre o modelo 3D utilizado em simulação de *software* e o dispositivo real de trabalho, utilizou-se a máquina de medir por coordenadas de modelo GAGEMAX 7/5/5 – HTG da marca Carl Zeiss, ilustrado com a ferramenta na figura 34. Este equipamento realiza sua medição através de método de contato de ponteira com pontas de esferas de rubi.

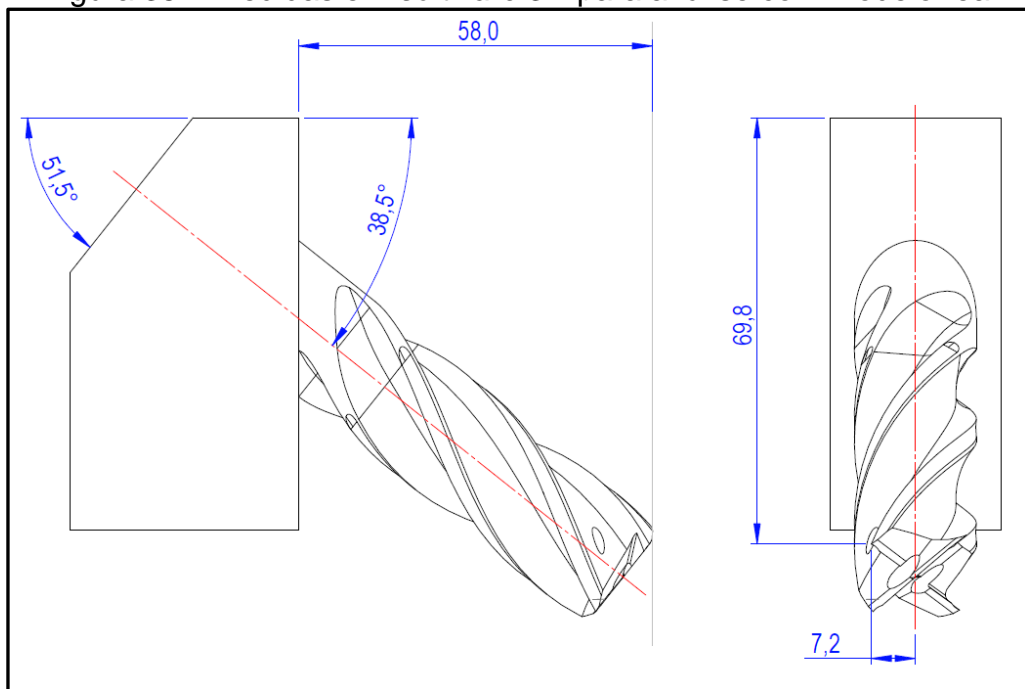
Figura 34 – Fresa montada em gabarito na máquina de medir por coordenadas



Fonte: O autor (2023).

Após análise das medidas apresentadas na figura 35 abaixo e dos valores dispostos na tabela 4, pode-se observar que os ângulos finais desenvolvidos praticamente não possuem divergência, o que garante que o ângulo do furo em relação aos gumes esteja conforme simulação. Para os posicionamentos lineares da fresa em relação ao bloco pode-se dizer que o desvio padrão encontrado é decorrente do fato de a medição ser por contato e depender de precisão visual do operador, portanto foram feitos ajustes de posicionamento no equipamento de eletroerosão.

Figura 35 – Medidas em *software* 3D para análise com modelo real



Fonte: O autor (2023).

Tabela 4 – Divergência de medidas entre modelos real e 3D

Medidas entre modelo real e 3D				
Medidas	Nominal	Média Real	Unidade	Desvio padrão
Ponta do gume em X	58	57,77	mm	0,09
Ponta do gume em Y	-7,2	-6,96		0,10
Ponta do gume em Z	-69,7	-69,31		0,19
Ângulo do Plano	51,51°	51,54°	graus	0,01
Ângulo da Ferramenta	38,49°	38,43°		0,02

Fonte: O autor (2023).

4.2 PREPARAÇÃO DE EMBUTIMENTOS

As medições de temperatura utilizadas neste trabalho são realizadas por termopares inseridos no corpo em que se deseja fazer a aquisição térmica, sendo assim nesta seção serão apresentados os métodos desenvolvidos para embutimento de termopares ao corpo de prova e as ferramentas.

4.2.1 Embutimento ao corpo de prova

O embutimento de termopares no corpo de prova requer duas etapas de processo, a preparação da furação em que os termopares são inseridos e também o método de fixação dos mesmos ao sistema de aquisição e à peça.

4.2.1.1 Preparação do corpo de prova

Nesta etapa do trabalho foram realizadas as 27 furações dos corpos de prova a serem usinados. Para desenvolvimento dos furos foram utilizadas brocas de aço rápido DIN 338 de 1,5 mm de diâmetro. Algumas destas ferramentas sofreram avarias devido à grande resistência do material do corpo de prova. Os resultados destas furações e desgaste sob o corpo de prova encontram-se na figura 36 abaixo.

Figura 36 – Corpo de prova usinado e pronto para inserção de termopares

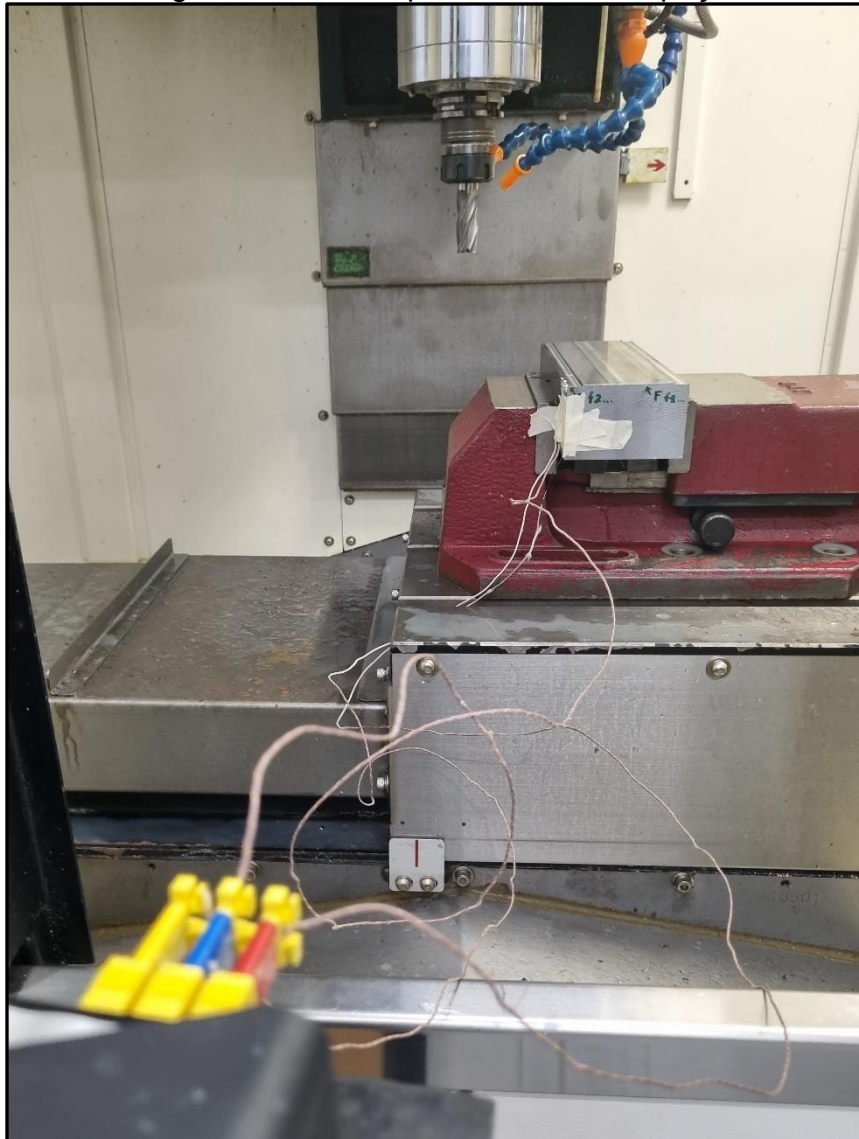


Fonte: O autor (2023).

4.2.1.2 Fixação de termopares ao corpo de prova

Os termopares são então fixados um a um em seus respectivos furos, a cada 3 passes de usinagem estes devem ser trocados para o próximo conjunto de furos até que se completem 9 passes no total. Ao trocar os termopares de posição é preciso cautela e atenção para que as ordens utilizadas sejam mantidas. Afim de melhorar a distribuição térmica para leitura dos termopares foram aplicadas doses de pasta térmica em todos os furos e então fixados para aquisição conforme figura 37.

Figura 37 – Termopares inseridos à peça



Fonte: O autor (2023).

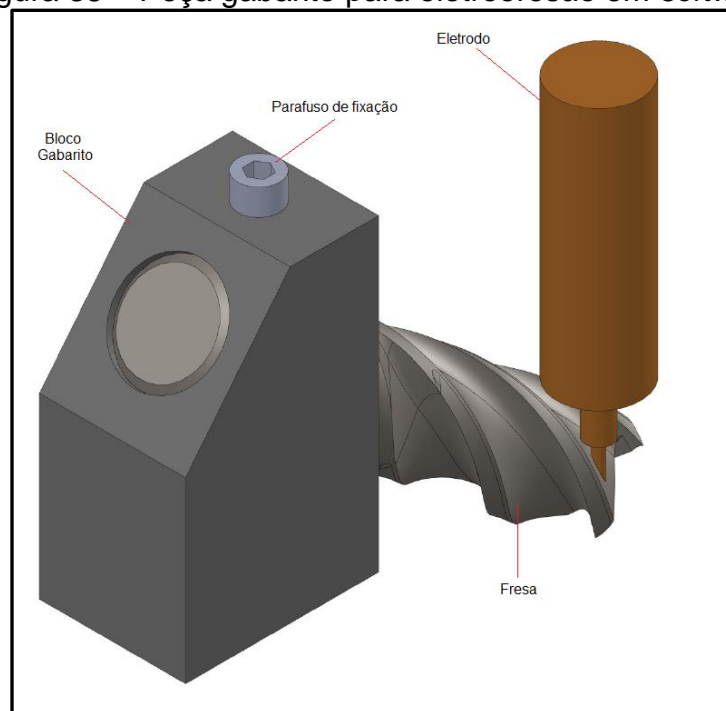
4.2.2 Embutimento da ferramenta

O embutimento de termopares nas ferramentas necessitou de diversas etapas, o posicionamento da ferramenta no equipamento de eletroerosão, a perfuração da ferramenta e a comparação do modelo real desenvolvido e do modelo de simulação 3D.

4.2.2.1 Posicionamento da eletroerosão

Conforme mencionado anteriormente e figura 38 abaixo, desenvolveu-se uma peça tipo gabarito para o posicionamento da fresa ao sistema de erosão e também para atingir as condições da furação determinadas em *software* de modelamento 3D, como ângulo de furação e profundidade de perfuração, mencionadas na seção de embutimento à ferramenta deste trabalho.

Figura 38 – Peça gabarito para eletroerosão em *software*



Fonte: O autor (2023).

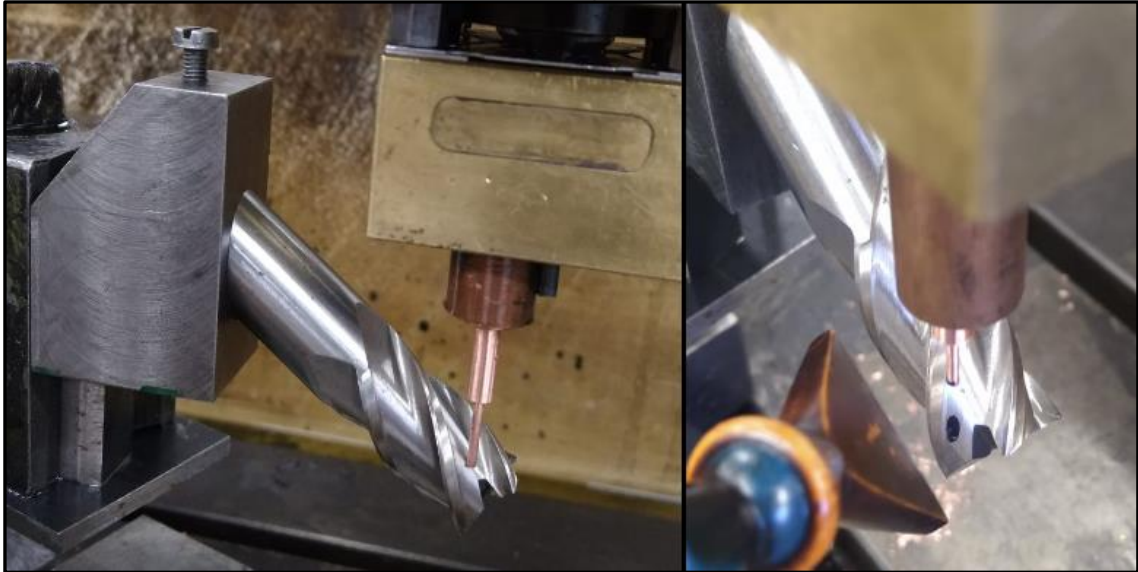
Para devido alinhamento, o eletrodo será encostado à aresta de corte da fresa e então através da simulação no *software* de modelamento 3D sabe-se o exato posicionamento para furação em relação ao ponto zero da aresta de corte, assim garante-se a repetitividade do processo para as outras fresas utilizadas nos ensaios.

4.2.2.2 Furação das fresas com eletroerosão

Primeiramente, para devido procedimento de furação de fresas foi utilizado um relógio comparador para batimento e alinhamento do conjunto de peça gabarito e fresa no equipamento de eletroerosão, como demonstrado na figura 40 abaixo. Posteriormente, foram definidas as posições zero do equipamento e consequentemente validação da posição do furo conforme simulação 3D.

Afim de garantir a efetividade do posicionamento e comprovação dos parâmetros da máquina, foi utilizada uma fresa de teste de 20 *mm* de diâmetro idêntica as fresas posteriormente utilizadas neste trabalho. Após perfuração da mesma, conforme figura 39, conclui-se que todos alinhamentos, parâmetros e posicionamentos estavam corretos.

Figura 39 - Posicionamento de conjunto peça gabarito e fresa teste na eletroerosão



Fonte: O autor (2023).

A eletroerosão é um processo que demanda grande quantidade de tempo, parte devido ao alto desgaste do eletrodo e a sua constante necessidade de retificação, sendo assim, foi necessário usinar o eletrodo para cada 1 *mm* perfurado, pois este apresentava uma camada que atrapalhava a formação do arco elétrico.

Em média foram necessárias 20 horas de trabalho por furo desenvolvido. Para a aplicação deste trabalho seriam necessários 3 furos no total, sendo 1 por tipo de tratamento das fresas, portanto, aproximadamente 60 horas de trabalho.

Sendo assim, após estes testes somente foi possível concluir a furação completa da fresa de teste e também de uma fresa sem tratamento de gume, conforme figura 40, a qual foi utilizada para teste do sistema de medição.

Figura 40 – Fresa sem tratamento preparada para inserção de termopares



Fonte: O autor (2023).

4.2.2.3 Comparativo entre modelo real e modelo 3D da fresa pós furação

Anteriormente se analisou medidas do modelo real e modelo tridimensional pré furação, portanto, afim de verificar e avaliar resultado de furação real e comparar com o modelo de simulação, foi desenvolvido comparativo de medidas relacionadas ao furo e encontrada variação média de $0,2\text{ mm}$. Para a profundidade do furo em relação ao gabarito, encontrou-se divergência de $0,15\text{ mm}$. Sendo assim, a folga determinada em projeto para possível diferenças entre real e projeto garantiu a profundidade final do furo e conseqüentemente a distância entre ele e o gume de corte da ferramenta.

4.3 Avaliação de temperaturas para termopar embutido à peça

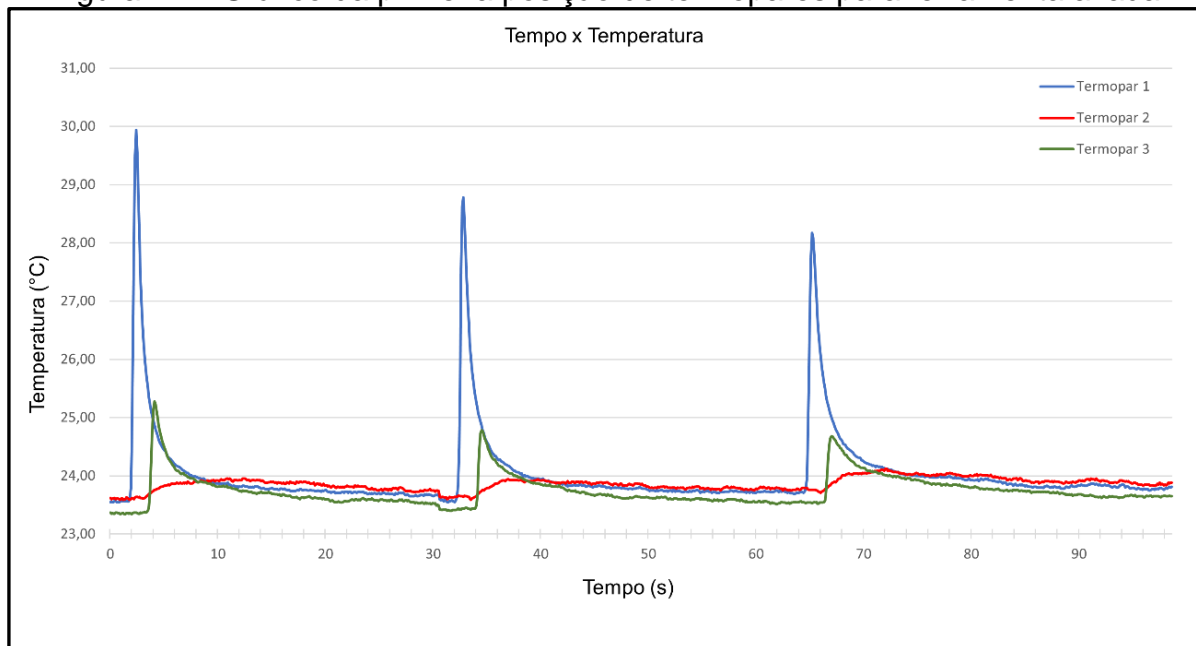
Após realização dos ensaios para todas as ferramentas e medições internas ao corpo de prova, os dados de temperaturas adquiridas serão apresentados nesta seção.

4.3.1 Ferramenta sem tratamento

4.3.1.1 Primeira posição de termopares

Após os 3 termopares terem sido devidamente fixados, realizam-se os passes desta configuração, portanto adquiriu-se uma média para toda a medição de 23,88 °C e a temperatura mais alta registrada neste ensaio foi de 29,94 °C no termopar 1. Aproximadamente a cada 31 segundos o gume atinge novamente a posição de leitura dos termopares, os quais tiveram como maiores valores de variação de temperatura 6,38 °C em 0,7 s, 5,23 °C em 0,8 s e 4,46 °C em 0,8 s. O comportamento térmico para este trio de termopares está representado na figura 41.

Figura 41 – Gráfico da primeira posição de termopares para ferramenta afiada



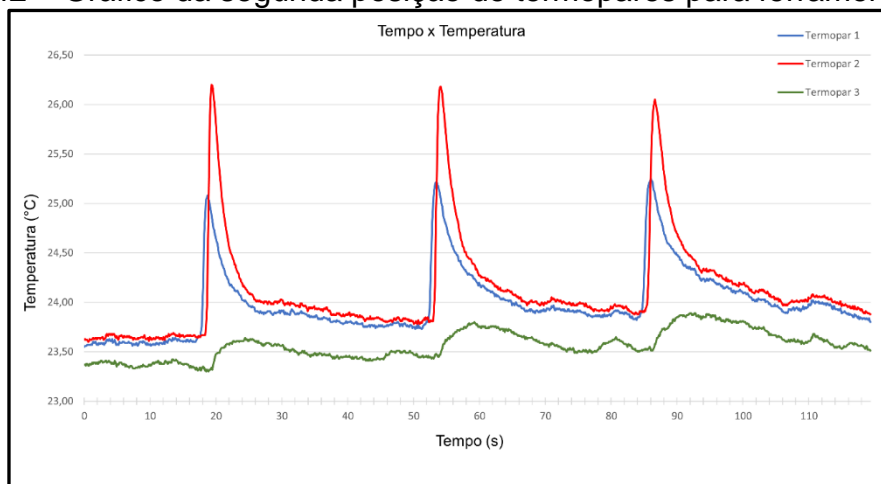
Fonte: O autor (2023).

O contato na região de escorregamento é caracterizado por picos de irregularidades das superfícies em contato e conseqüentemente, picos de temperaturas por pequenos períodos de tempo (TRENT, 1988; DINIZ et al. 1999). Portanto, estes picos observados são esperados e devem se repetir para quaisquer posições de termopares deste trabalho. Nesta medição pelo fato de o termopar 2 não ter adquirido medidas de pico, recomenda-se a realização deste ensaio novamente.]

4.3.1.2 Segunda posição de termopares

Para esta configuração, aproximadamente a cada 33 segundos o gume atinge novamente a posição de leitura dos termopares. Ao analisar todos os dados de temperatura para este ensaio, adquiriu-se uma média para toda a medição de 23,89 °C e a temperatura mais alta registrada neste ensaio foi de 26,20 °C no termopar 2. Os maiores valores de variação de temperatura obtidos foram de 2,53 °C em 1 s, 2,37 °C em 1,1 s e 2,14 °C em 1,5 s. O comportamento térmico para este trio de termopares está representado na figura 42 mais abaixo.

Figura 42 – Gráfico da segunda posição de termopares para ferramenta afiada



Fonte: O autor (2023).

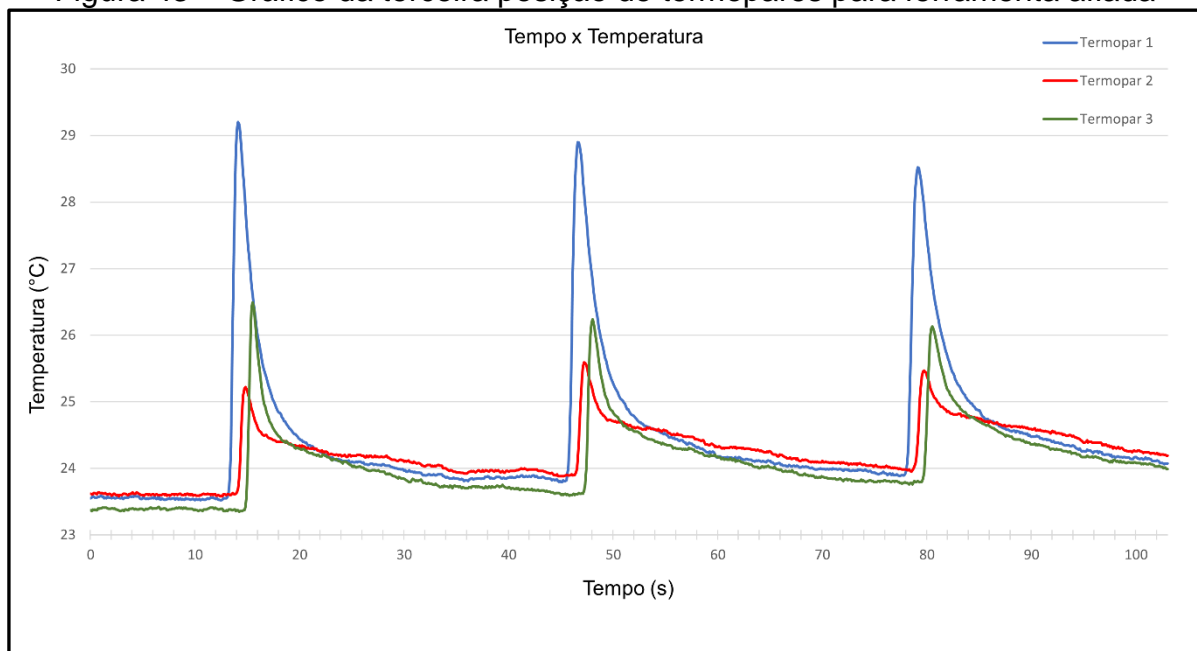
Diferentemente do ensaio da primeira posição de termopares, neste ensaio o termopar 2 é o que possui os maiores picos de medição e conseqüentemente maiores valores de variação de temperatura. O maior pico de temperatura foi registrado no termopar 2 no valor de 26,20 °C. Ao analisar curva térmica do termopar 3 recomenda-se reaquisição de seus dados pois suas variações térmicas de pico não estão proporcionais aos outros termopares desta análise.

4.3.1.3 Terceira posição de termopares

Para a terceira posição de termopares para esta ferramenta foi obtida uma média total dos três termopares durante esta medição de 23,81 °C e cerca de 32 segundos entre cada contato do gume com região dos termopares. Os picos de temperatura da região de escorregamento podem ser percebidos nos três termopares, o que evidencia a maior necessidade de escoamento de cavaco para regiões finais de usinagem do ensaio.

Os maiores valores de variação de temperatura adquiridos são os de 5,65 °C em 1,1 s, 5,08 °C em 1,1 s e 4,61 °C em 1,2 s presentes no termopar 1 desta medição. A temperatura mais alta adquirida se manifestou no termopar 1 no valor de 29,20 °C. O gráfico das temperaturas analisadas está representado na figura 43.

Figura 43 – Gráfico da terceira posição de termopares para ferramenta afiada



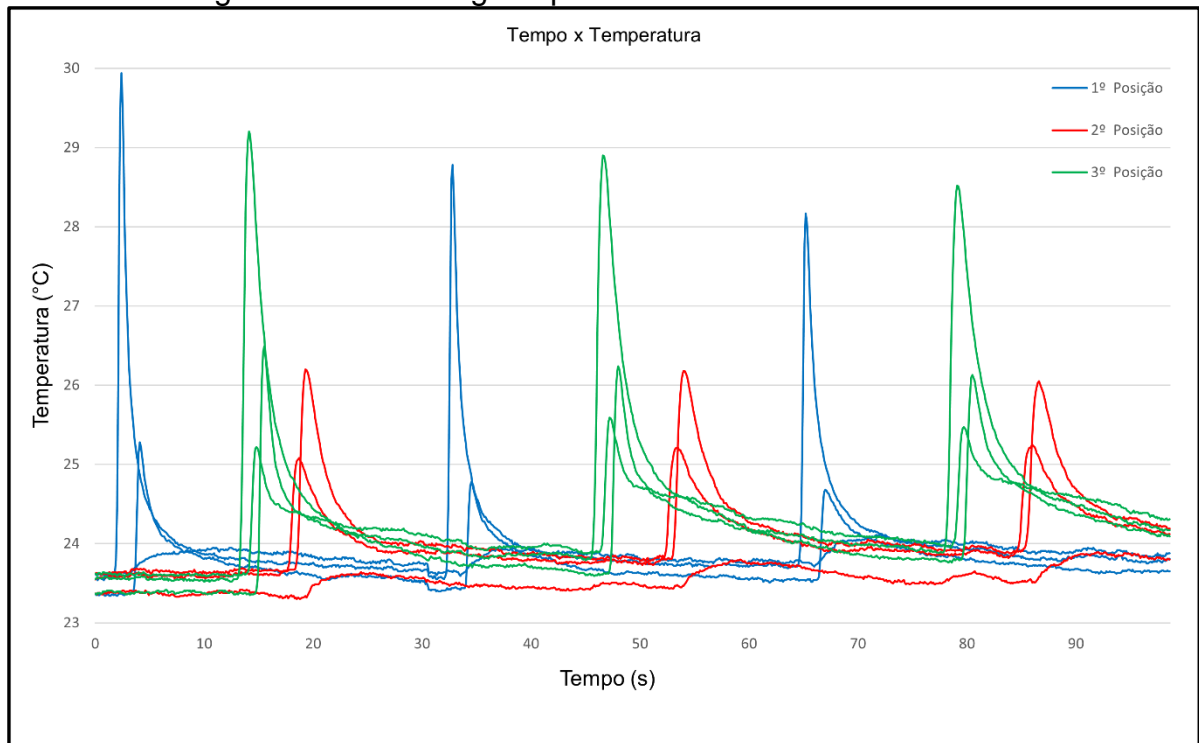
Fonte: O autor (2023).

4.3.1.4 Temperaturas gerais para as três posições de termopares

A seguir apresenta-se um gráfico que reúne todas as medições para as três posições de termopares conforme ilustrado na figura 44 abaixo. Para todos os termopares o maior valor de variação de temperatura foi de 6,38 °C no termopar 1 da primeira posição. A temperatura de pico mais alta encontrada foi de 29,20 °C na primeira posição. Nota-se que o comportamento entre todas as posições é semelhante apesar de diferentes valores de picos de temperaturas.

A média entre os maiores valores de variações de temperatura calculada para esta ferramenta foi de 4,27 °C. Acredita-se que a medição para a terceira posição seja a mais equilibrada e, portanto, a mais confiável.

Figura 44 – Gráfico geral para ensaio de ferramenta afiada



Fonte: O autor (2023).

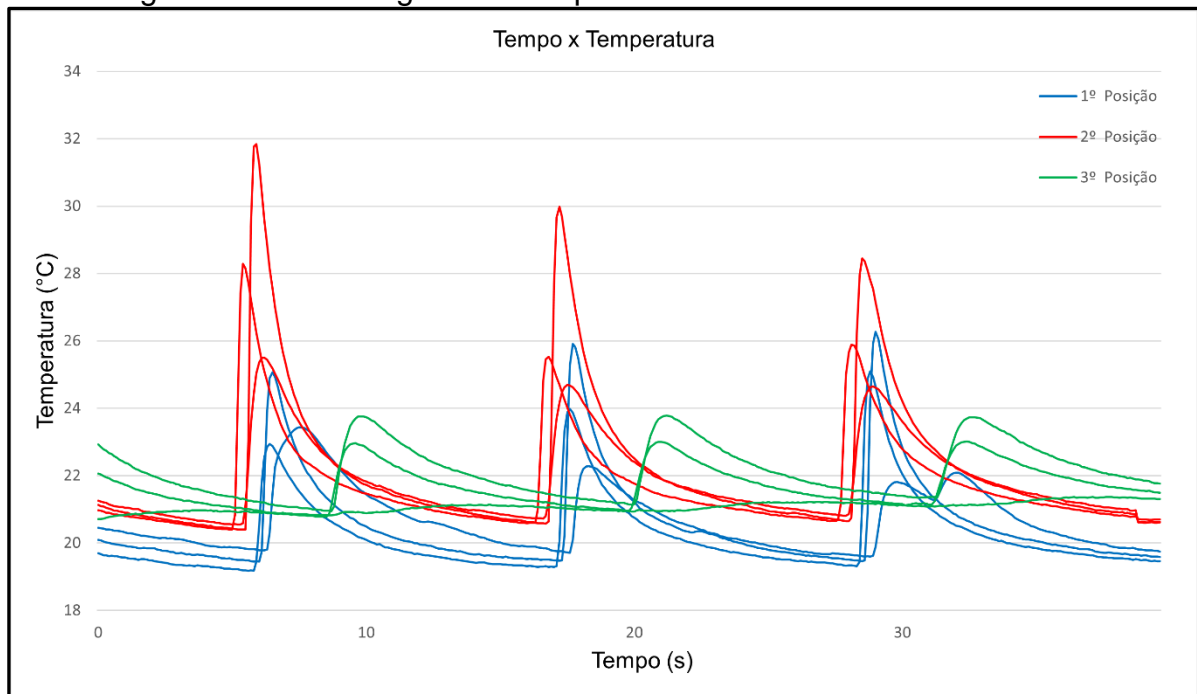
4.3.1.5 Comparativos com outros trabalhos sem tratamento

Os valores encontrados nos gráficos apresentados anteriormente podem ser comparados diretamente com os resultados obtidos por Zeilmann (2023), o qual empregou os mesmos parâmetros de usinagem, porém com fresa de metal duro de topo reto sem tratamento de 6 mm de diâmetro.

Ao analisar as variações de temperatura, a maior encontrada foi de 11,4 °C em 0,4 s da segunda posição o que é aproximadamente duas vezes maior que a maior variação encontrada neste trabalho para este tratamento de ferramenta. O maior valor de temperatura de pico foi encontrado na segunda posição de termopares no valor de 31,84 °C, o que seria 6% maior que a maior adquirida neste trabalho.

Por mais que a segunda posição de termopares possua altos picos de temperatura, o mais equilibrado e mais confiável comportamento térmico é o da primeira posição. O gráfico geral de temperaturas está ilustrado na figura 45 e se assemelha ao desenvolvido no presente trabalho.

Figura 45 – Gráfico geral de temperaturas de fresas afiadas de 6 mm



Fonte: Adaptado de Zeilmann (2023).

4.3.2 Ferramenta polida com H 4/400

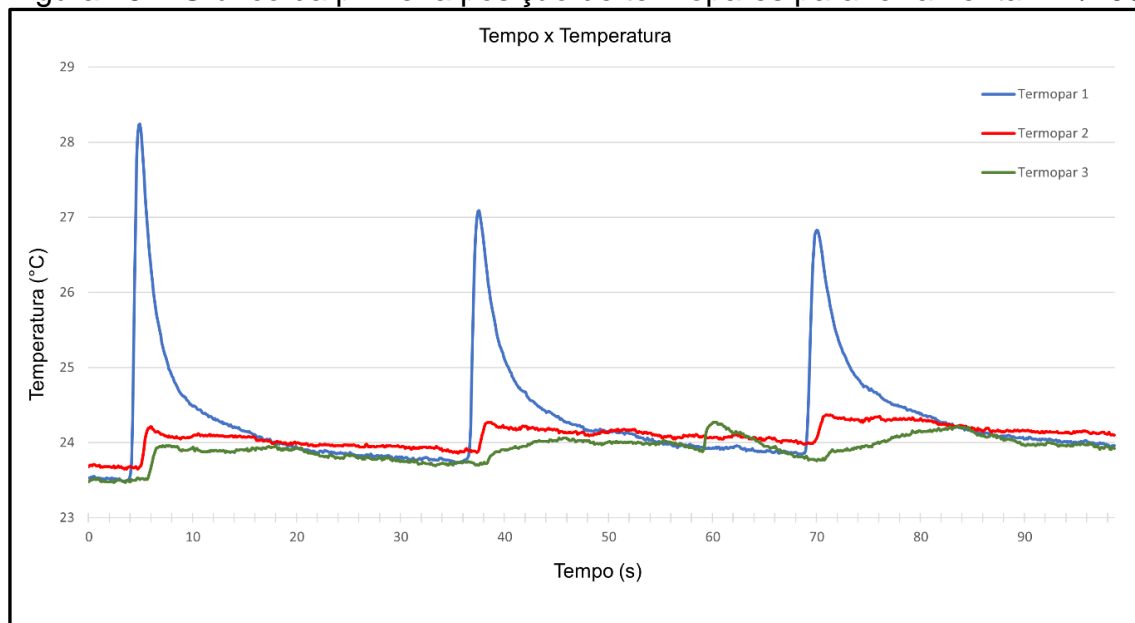
4.3.2.1 Primeira posição de termopares

Os resultados decorrentes da ferramenta com polimento H 4/400 serão apresentados assim como feito anteriormente para fresa sem polimento, apresentam-se três conjuntos de dados de temperatura, para a primeira disposição de termopares, a média de temperaturas obtida foi de 24,1 °C.

A temperatura mais alta registrada foi de 28,24 °C. no termopar 1. Neste ensaio a média de intervalo entre medições de pico foram de 33 segundos. Para este ensaio os maiores valores de variação de temperatura encontrados foram de 4,72 °C em 1 s, 3,3 °C em 1,1 s e 2,97 °C em 1,2 s. A figura 46 mais abaixo apresenta o comportamento térmico deste ensaio.

Assim como observado anteriormente nos testes com a ferramenta sem tratamento, o gráfico caracteriza-se por picos de temperatura decorrentes do primeiro contato do gume na zona de medição do termopar e das particularidades geradas pela região de escorregamento. Porém para este ensaio em particular, acredita-se que os termopares 2 e 3 não adquiriram valores corretos de medição devido à falta de picos relativos em suas curvas térmicas, provavelmente ocorrido devido a falha na fixação dos termopares a estes furos em questão.

Figura 46 – Gráfico da primeira posição de termopares para ferramenta H 4/400



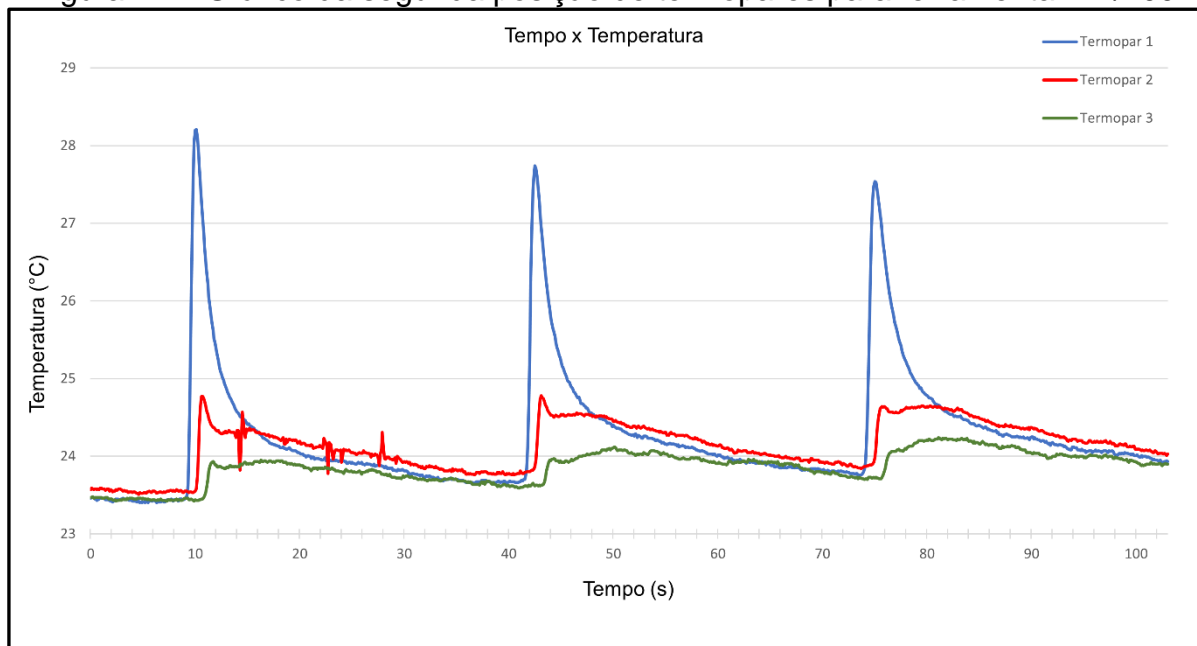
Fonte: O autor (2023).

4.3.2.2 Segunda posição de termopares

A aquisição de temperaturas para o segundo trio de termopares para esta ferramenta obteve uma temperatura média dos três termopares durante toda esta medição de 23,65 °C. O maior valor de temperatura obtido para este ensaio foi de 28,21 °C no termopar 1. O intervalo entre os contatos do gume neste ensaio é de aproximadamente 32 segundos. Já os maiores valores de variação de temperatura encontrados foram de 4,75 °C em 1,1 s, 4,06 °C em 1,2 s e 3,77 °C em 1,2 s. As curvas térmicas podem ser visualizadas conforme figura 47.

Apesar de as curvas térmicas dos termopares 2 e 3 deste ensaio terem apresentados valores baixos de pico, seus resultados são coerentes por apresentarem variações de temperatura no momento de contato do gume com a região de medição dos termopares.

Figura 47 – Gráfico da segunda posição de termopares para ferramenta H 4/400



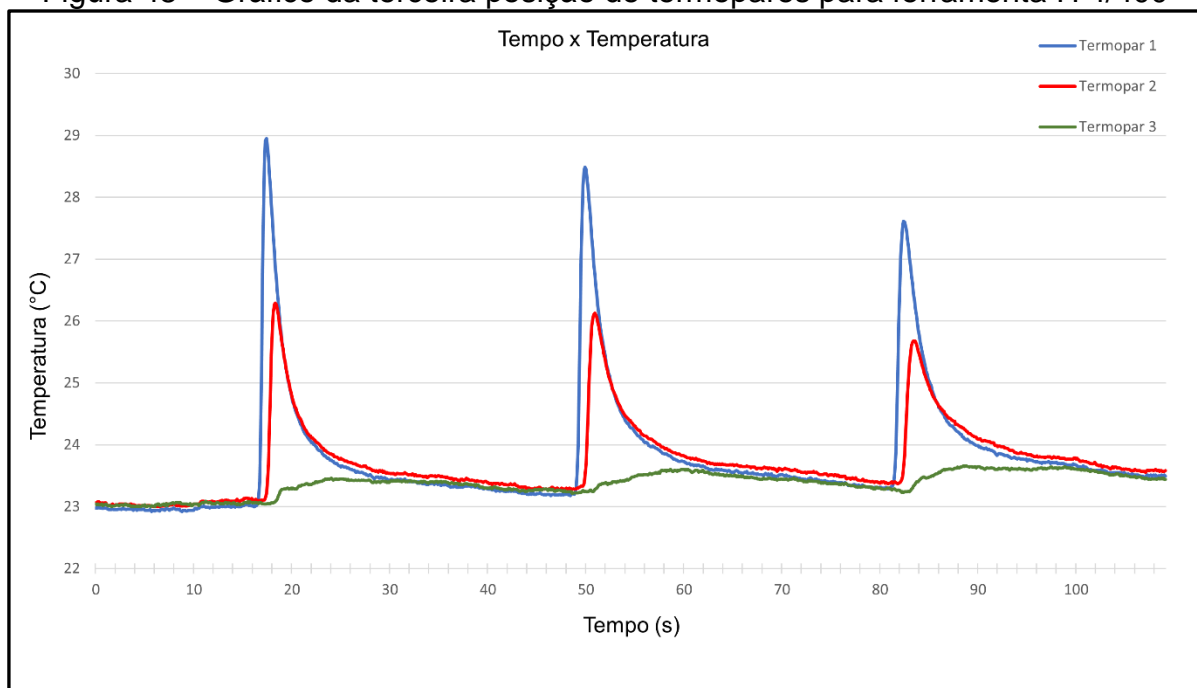
Fonte: O autor (2023).

4.3.2.3 Terceira posição de termopares

Por fim, para a terceira posição de termopares para esta ferramenta foi obtida uma temperatura média para os 3 termopares durante toda esta medição de 23,39 °C e o pico mais alto de temperatura aconteceu no termopar 1 no valor de 28,95 °C. Os contatos entre o gume e a região de posicionamento dos termopares tem intervalos de aproximadamente 32 segundos. Para este ensaio os maiores valores de variação de temperatura adquiridos foram de 5,93 °C em 1 s, 5,29 °C em 1,1 s e 4,27 °C em 1,1 s. O comportamento térmico pode ser visualizado conforme figura 48.

Ao analisar as curvas para este teste, nota-se que o termopar 3 apresenta pequenas variações de temperatura para seus picos, conseqüentemente os dados de temperaturas adquiridos por este não foram precisas conforme planejado, sendo assim, sugere-se avaliação do motivo para tal e então realização de novo ensaio.

Figura 48 – Gráfico da terceira posição de termopares para ferramenta H 4/400



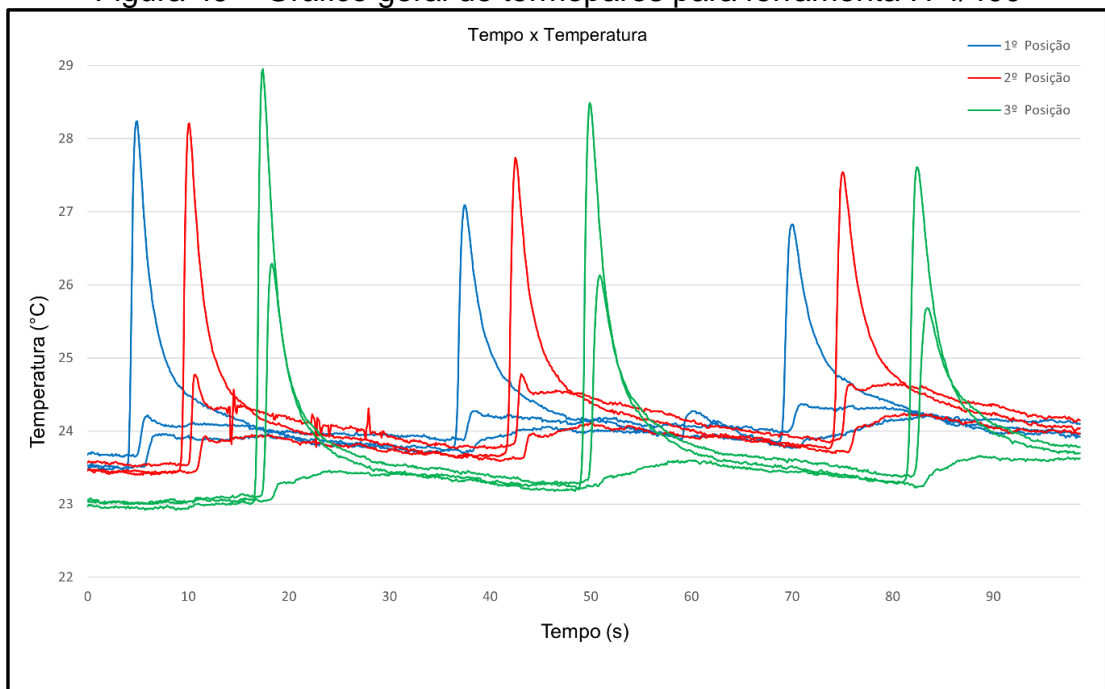
Fonte: O autor (2023).

4.3.2.4 Temperaturas gerais para as três posições de termopares

Ao analisar o gráfico geral desta posição de termopares da ferramenta H 4/400, figura 49 mais abaixo, é notável a diferença entre os valores de pico para cada conjunto de termopares. Para todos os termopares o maior valor de variação de temperatura foi de 5,93 °C no termopar 1 da terceira posição.

O maior valor de temperatura encontrado foi o de 28,95 °C da terceira posição. Ao avaliar todas as variações de valores de temperatura, calculou-se uma média para tal de 4,33 °C, cerca de 1% maior que a ferramenta sem tratamento. Para esta ferramenta acredita-se que o ensaio mais confiável e preciso é o da segunda posição de termopares.

Figura 49 – Gráfico geral de termopares para ferramenta H 4/400



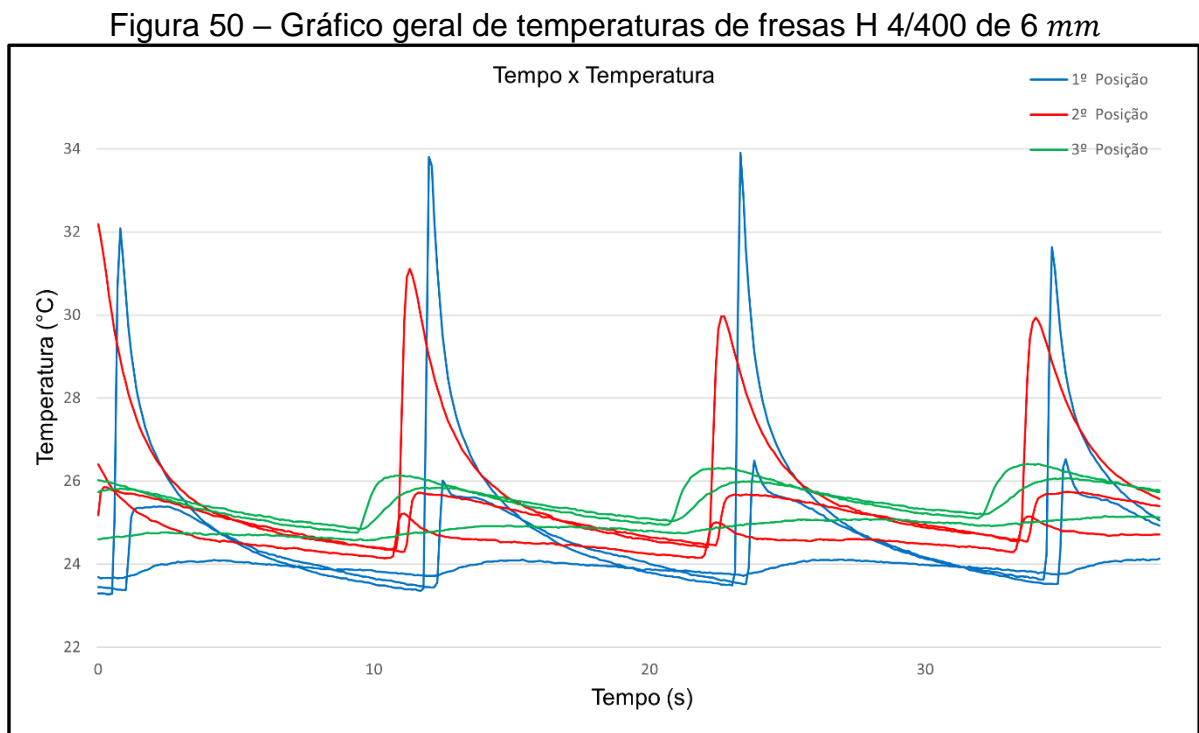
Fonte: O autor (2023).

Segundo Trent (1988), a região de aderência entre cavaco e superfície de saída da ferramenta contém uma zona de aderência, portanto no decorrer da usinagem esta aderência aumenta conforme maiores comprimentos de contato. Ainda nesta linha, Diniz et al. (1999) afirma que os valores de temperatura são proporcionais à região de aderência. Em outras palavras, conforme o comprimento de usinagem aumenta, os valores de temperatura mais afastados do início do processo devem ser maiores devido a aderência de material.

4.3.2.5 Comparativos com outros trabalhos para polimento H 4/400

Novamente, os valores encontrados nos gráficos apresentados anteriormente podem ser comparados diretamente com os resultados obtidos por Zeilmann (2023), que utilizou uma fresa de topo reto de 6 mm polida com H 4/400 e mesmas condições de usinagem.

As variações de temperatura foram investigadas, sendo assim a maior encontrada foi de 10,44 °C em 0,3 s para o primeiro termopar da primeira posição, o que é cerca de duas vezes maior que a maior variação encontrada neste trabalho. A maior temperatura de pico encontrada por Zeilmann (2023) foi no valor de 33,91 °C na primeira posição de termopares, sendo assim 17% maior que o maior pico encontrado neste trabalho. O comportamento térmico do estudo está ilustrado na figura 50.



Fonte: Adaptado de Zeilmann (2023).

4.3.3 Ferramenta polida com HSC 1/300

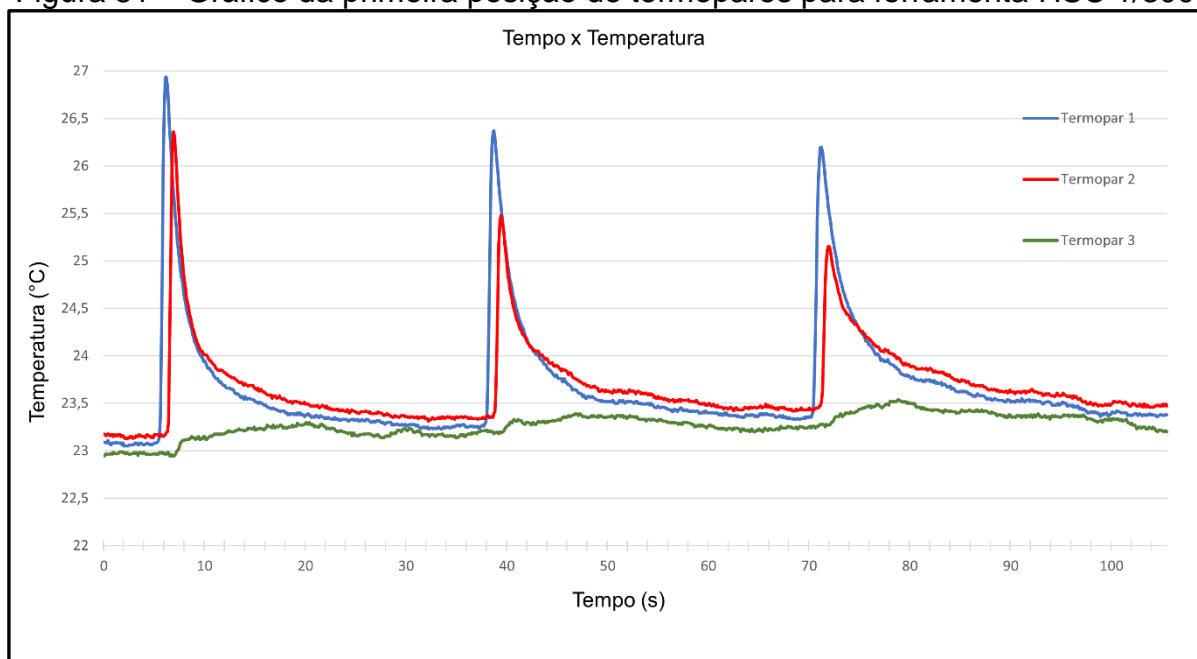
4.3.3.1 Primeira posição de termopares

Ao realizar os ensaios utilizando a ferramenta com polimento HSC 1/300, assim como feito anteriormente para fresa sem polimento e com polimento H 4/400, apresentam-se 3 conjuntos de dados de temperatura, a média geral adquirida para este ensaio foi de 23,54 C° e a temperatura mais alta registrada foi de 26,94 C° no termopar 1.

A figura 51 mais abaixo representa o comportamento térmico do processo. Para este ensaio os maiores valores de variação de temperatura encontrados foram de 3,85 °C em 0,9 s, 3,09 °C em 0,9 s e 2,85 °C em 1 s. O intervalo entre cada passe da ferramenta na região dos termopares é aproximadamente de 32 s.

Assim como observado anteriormente nos testes com a ferramenta sem tratamento e para o outro polimento, o gráfico caracteriza-se por picos de temperatura decorrentes do contato do gume próximo ao termopar e das particularidades geradas pela região de escorregamento. Para este ensaio recomenda-se reaquisição do termopar 3 pois este não obteve dados de temperatura coerentes ao esperado.

Figura 51 – Gráfico da primeira posição de termopares para ferramenta HSC 1/300



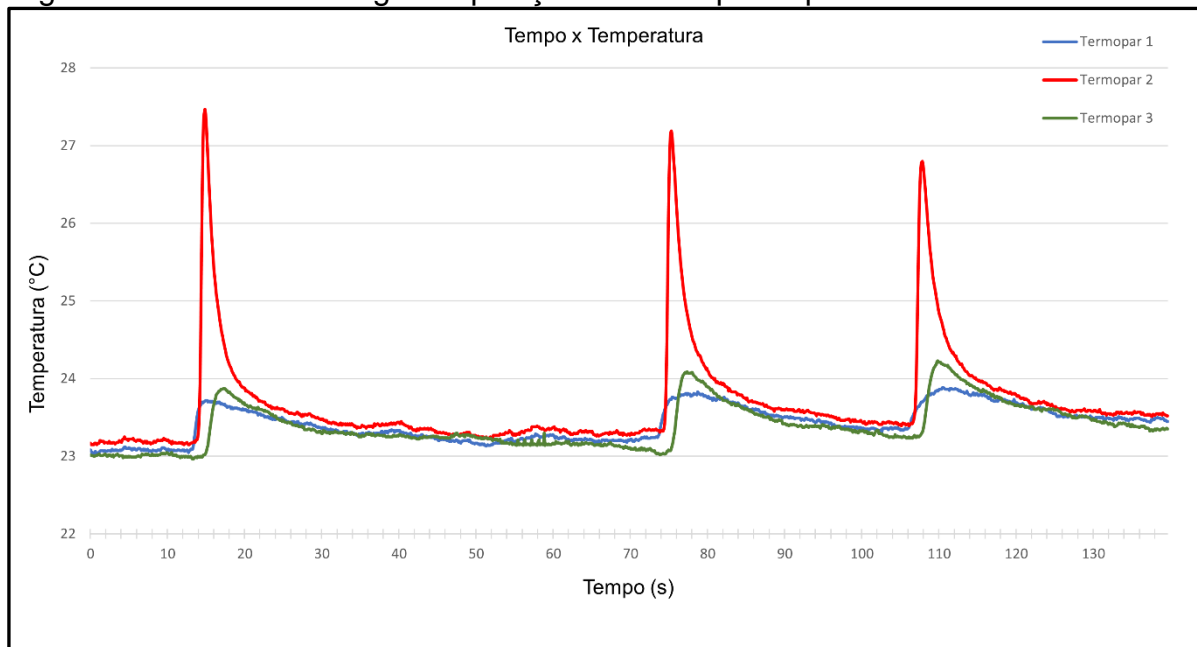
Fonte: O autor (2023).

4.3.3.2 Segunda posição de termopares

A captação de temperaturas para o segundo trio de termopares desta ferramenta obteve como resultado a temperatura média dos 3 termopares durante toda esta medição de 23,49 °C. O comportamento térmico pode ser visualizado conforme figura 52 mais abaixo. O maior valor de temperatura obtido para este ensaio foi de 27,47 °C para o termopar 2. Para este ensaio os maiores valores de variação de temperatura encontrados foram de 4,22 °C em 0,9 s, de 3,84 °C em 1 s e de 3,34 °C em 1,1 s.

Durante este ensaio ocorreu uma breve interrupção do processo de usinagem devido a rápida verificação de fixação, pois caso houvessem problemas de posicionamento dos termopares, a medição completa poderia ser comprometida. Apesar da grande diferença entre variações de temperatura de pico entre o termopar 2 e os demais, todos os termopares apresentam comportamento coerente ao esperado, o que pode indicar certa precisão no método.

Figura 52 – Gráfico da segunda posição de termopares para ferramenta HSC 1/300



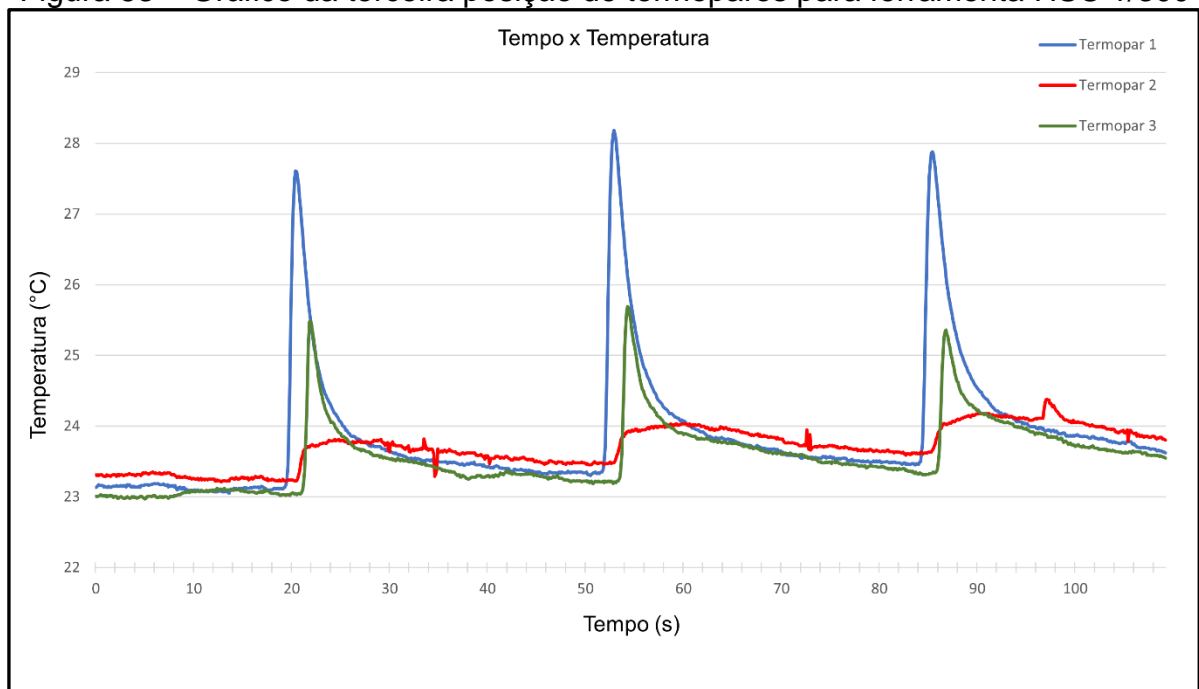
Fonte: O autor (2023).

4.3.3.3 Terceira posição de termopares

Para terceira posição de termopares para esta ferramenta foi obtida uma temperatura média dos 3 termopares durante toda esta medição de 23,72 °C e o pico mais alto de temperatura aconteceu no termopar 1 no valor de 28,18 °C. As maiores variações de temperatura ocorreram também no termopar 1, sendo estas de 4,48 °C em 1,1 s, de 4,79 °C em 1,1 s e de 4,38 °C em 1,2 s. O intervalo aproximado entre cada medição de temperatura do contato do gume à região dos termopares encontrado foi de 32 s.

O comportamento térmico pode ser visualizado conforme figura 53. Todas as curvas apresentadas neste gráfico apresentam as características esperadas para as medições realizadas.

Figura 53 – Gráfico da terceira posição de termopares para ferramenta HSC 1/300



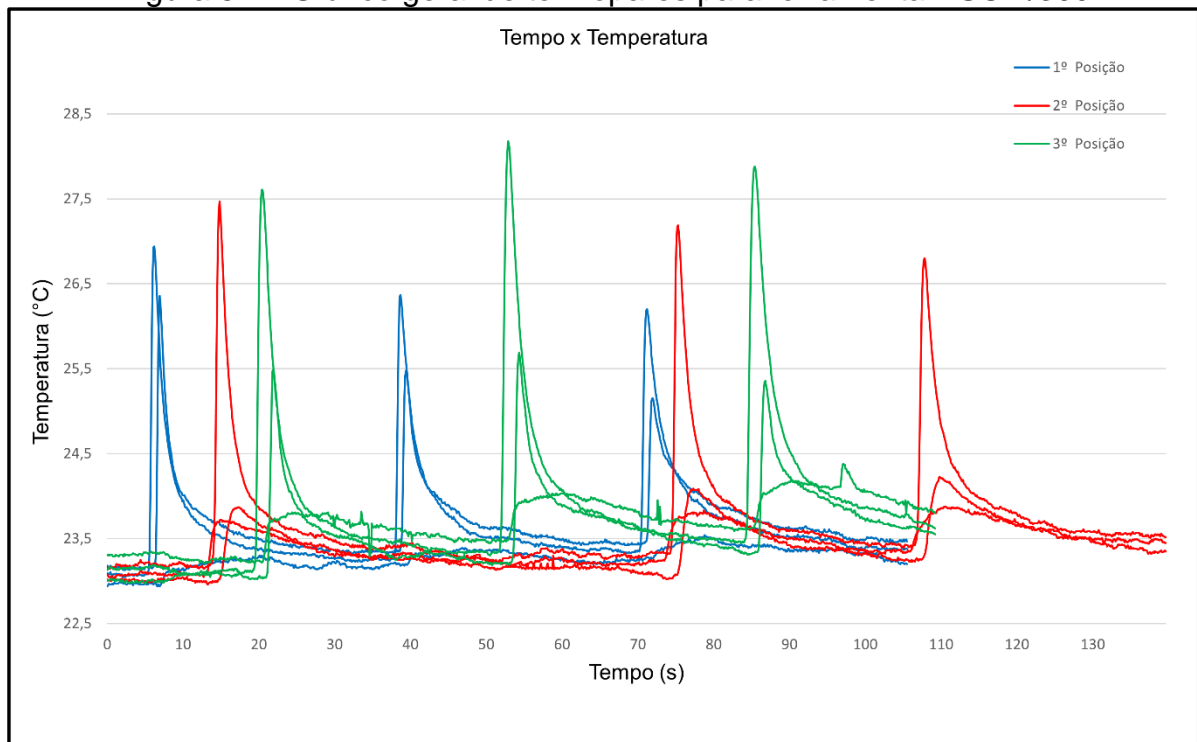
Fonte: O autor (2023).

4.3.3.4 Temperaturas gerais para as três posições de termopares

Investigando a figura 54 mais abaixo, é facilmente perceptível a diferença entre os valores de pico para cada conjunto de termopares, onde novamente comprova-se que quanto mais perto do final do comprimento de ensaio, maiores as temperaturas a serem registradas devida a aderência de material.

Ao calcular a média dos valores de variação de temperatura para todos os termopares, encontrou-se 3,87 °C. O valor mais alto alcançado foi de 28,18 °C encontrado na terceira posição. Ao analisar as curvas térmicas pode-se definir que a terceira posição de termopares foi a medição mais balanceada e confiável.

Figura 54 – Gráfico geral de termopares para ferramenta HSC 1/300



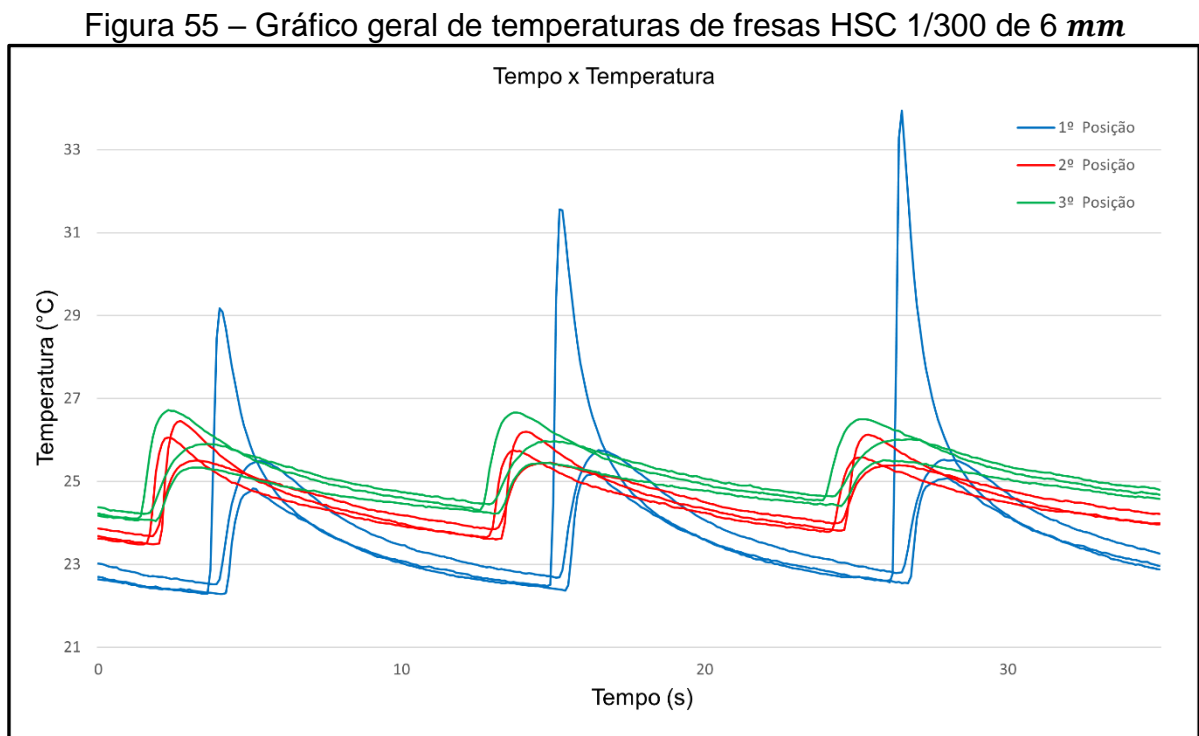
Fonte: O autor (2023).

Novamente, conforme mencionado anteriormente, este gráfico também evidencia a influência da zona de aderência nos valores de temperatura, sendo assim os valores de temperatura da terceira posição são os maiores.

4.3.3.5 Comparativos com outros trabalhos para polimento HSC 1/300

Os gráficos apresentados neste trabalho podem ser comparados diretamente com os resultados obtidos por Zeilmann (2023), utilizando uma fresa de topo reto de 6 mm polida com HSC 1/300 e mesmas condições de usinagem.

Analisaram-se as variações de temperatura, sendo assim a maior encontrada foi de 11,16 °C em 0,3 s, o que é aproximadamente duas vezes maior que a adquirida neste trabalho. O maior valor de temperatura de pico encontrado foi de 33,94 °C na primeira posição de termopares, cerca de 20% maior quando comparado ao maior valor de pico adquirido neste trabalho. O comportamento térmico está ilustrado na figura 55.

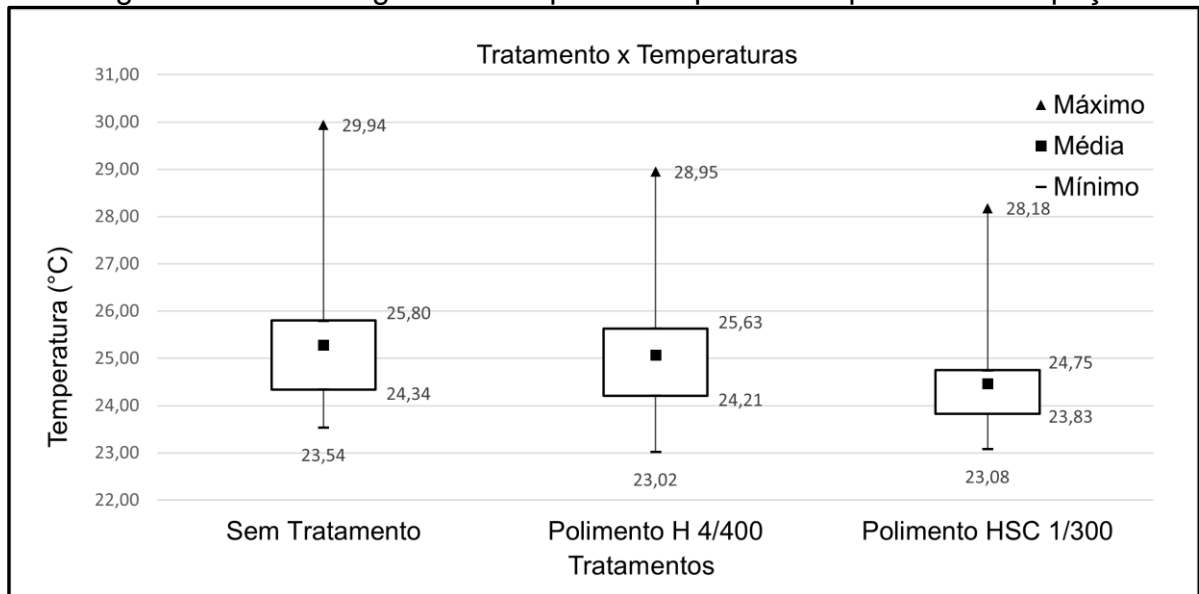


Fonte: Adaptado de Zeilmann (2023).

4.3.4 Gráfico de temperaturas para todas as ferramentas

Previamente foram apresentadas as temperaturas para cada variação de uso do termopar e ferramenta, sendo assim, afim de representar visualmente as 9 maiores medições térmicas de todo o processo para cada ferramenta, apresenta-se a figura 56 com análise estatística dos dados. O desvio padrão das 9 maiores temperaturas para a ferramenta sem tratamento é de 1,33, para a de polimento H 4/400 é 1,21 e para a de polimento HSC 1/300 é 1,00.

Figura 56 – Gráfico geral de temperaturas para termopar inserido à peça

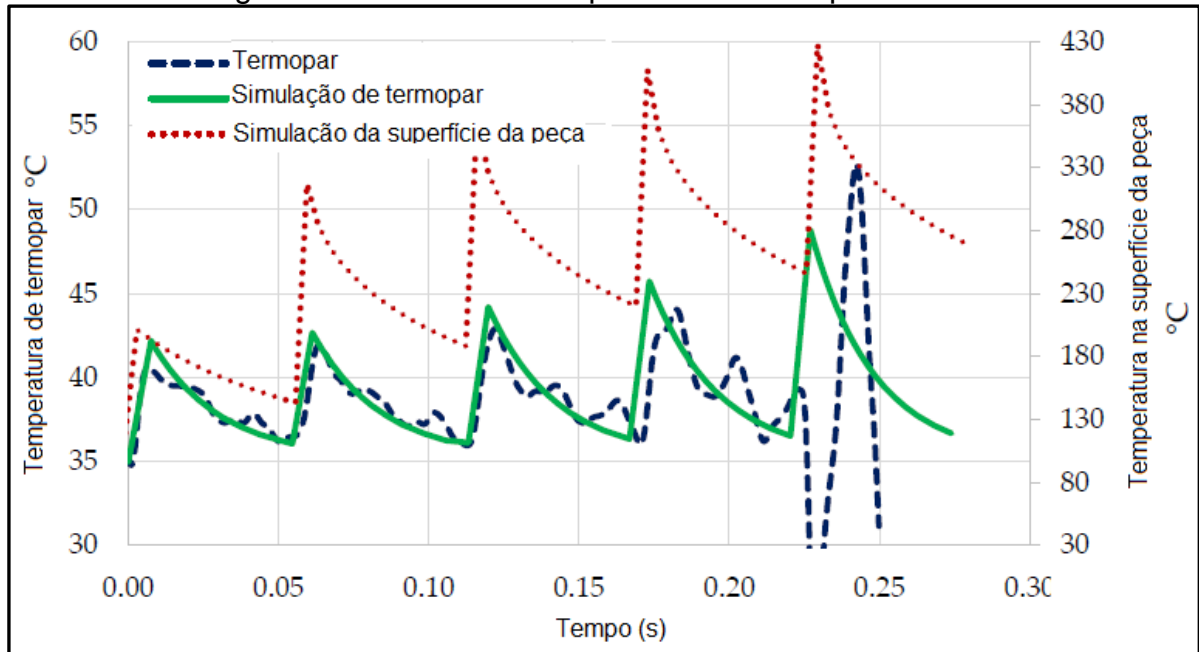


Fonte: O autor (2023).

Nesta figura 57 acima é visível a diferença entre os valores máximos adquiridos para cada tipo de tratamento e também a diminuição da concentração de grande parte das temperaturas obtidas conforme muda-se para a ferramenta com tratamento com média HSC 1/300.

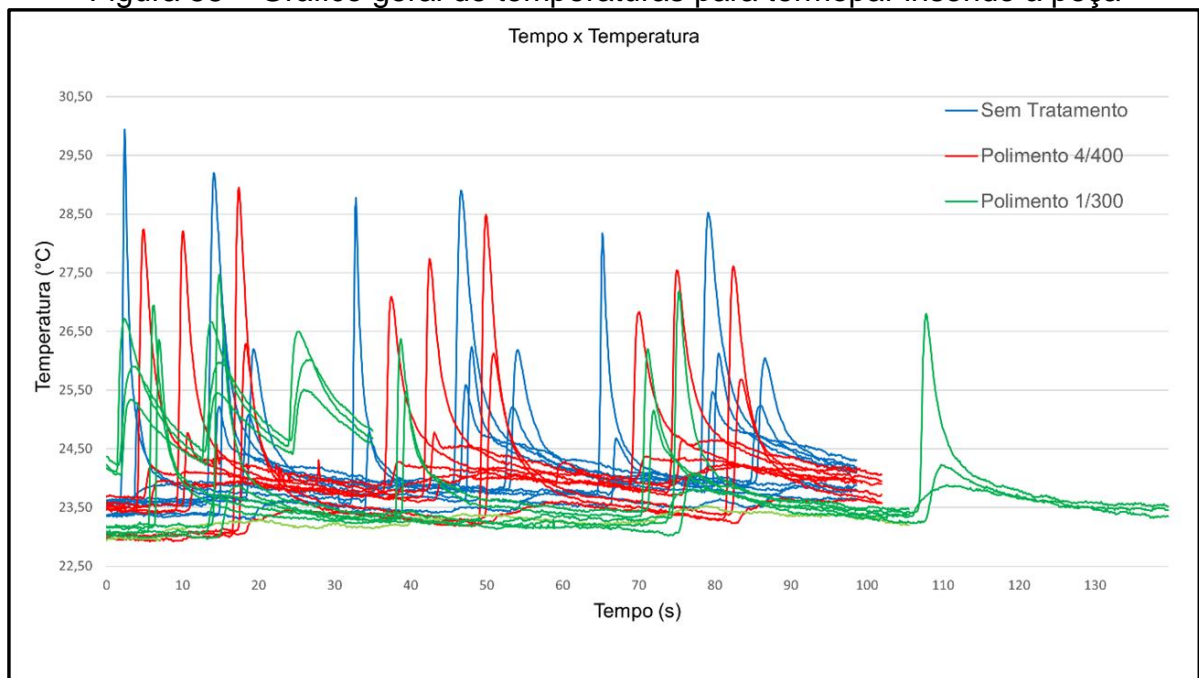
Gräbner et al. (2021) também utilizou de termopares inseridos à peça para medições de temperatura e obteve a figura 57 como resultado. Ao comparar seu trabalho com a figura 58 nota-se que comportamento das curvas térmicas entre trabalhos é similar.

Figura 57 – Gráfico de temperaturas obtido por Gräbner



Fonte: Adaptado de Gräbner et al. (2021).

Figura 58 – Gráfico geral de temperaturas para termopar inserido à peça



Fonte: O autor (2023).

4.3.5 Avaliação do efeito do polimento

Ao observar e analisar a figura 58 apresentada anteriormente, é visível graficamente que as ferramentas com tratamento de gume, polidas, obtiveram em média temperaturas inferiores à ferramenta sem tratamento.

Bordin e Zeilmann (2014), afirmam que tratamentos de gume melhoram a distribuição de calor e a formação e fluxo do cavaco, pois conforme Klocke (2009) instrui, o arredondamento do gume é desenvolvido justamente para facilitar o escoamento do cavaco para o flanco do gume e conseqüentemente melhorar a distribuição térmica para a peça já que a região de aderência é reduzida.

Foram realizadas comparações diretas entre a média das 9 temperaturas máximas e das médias de variações de temperatura obtidas para cada tipo de tratamento de gume, seus resultados estão expressos na tabela 5 abaixo.

Tabela 5 – Temperaturas máximas para ferramentas tratadas e não tratadas

Tratamentos	Médias de temperaturas máximas	Médias de variações
Sem tratamento	28 °C	4,27 °C
H 4/400	27,8 °C	4,33 °C
HSC 1/300	26,7 °C	3,87 °C

Fonte: O autor (2023).

Ao analisar a figura 57 e a tabela 5, pode-se dizer que a fresa com média H 4/400 obteve valores de temperatura máxima 1% mais baixos que a sem tratamento, porém cerca de 1% a mais no valor da média de suas variações. E então para o ensaio que utiliza média HSC 1/300 encontraram-se valores de temperatura máxima 5% menores que a fresa sem tratamento e 10% a menos quando comparadas suas médias de variações.

Sendo assim, a ferramenta polida com média HSC 1/300 possui os menores e mais equilibrados valores de temperatura, o que torna a aquisição de dados desta ferramenta a mais confiável e conseqüentemente apresenta melhor eficácia térmica para o processo.

Assim como este estudo, Bordin e Zeilmann (2014), estudaram e mediram as temperaturas de ferramentas não tratadas e tratadas por arraste em furações à seco, e então, da mesma forma que neste trabalho, obtiveram pequenas diferenças de valores para os tratamentos por arraste, cerca de 8% entre as fresas sem tratamento e com tratamento de arraste, conforme tabela 6 abaixo.

Tabela 6 – Temperaturas máximas para ferramentas tratadas e não tratadas

Temperaturas máximas para ferramentas tratadas e não tratadas	
Tratamentos das ferramentas	Temperaturas máximas
Sem tratamento	70°C
Tratadas por arraste	65°C

Fonte: Adaptado de Zeilmann e Bordin (2014).

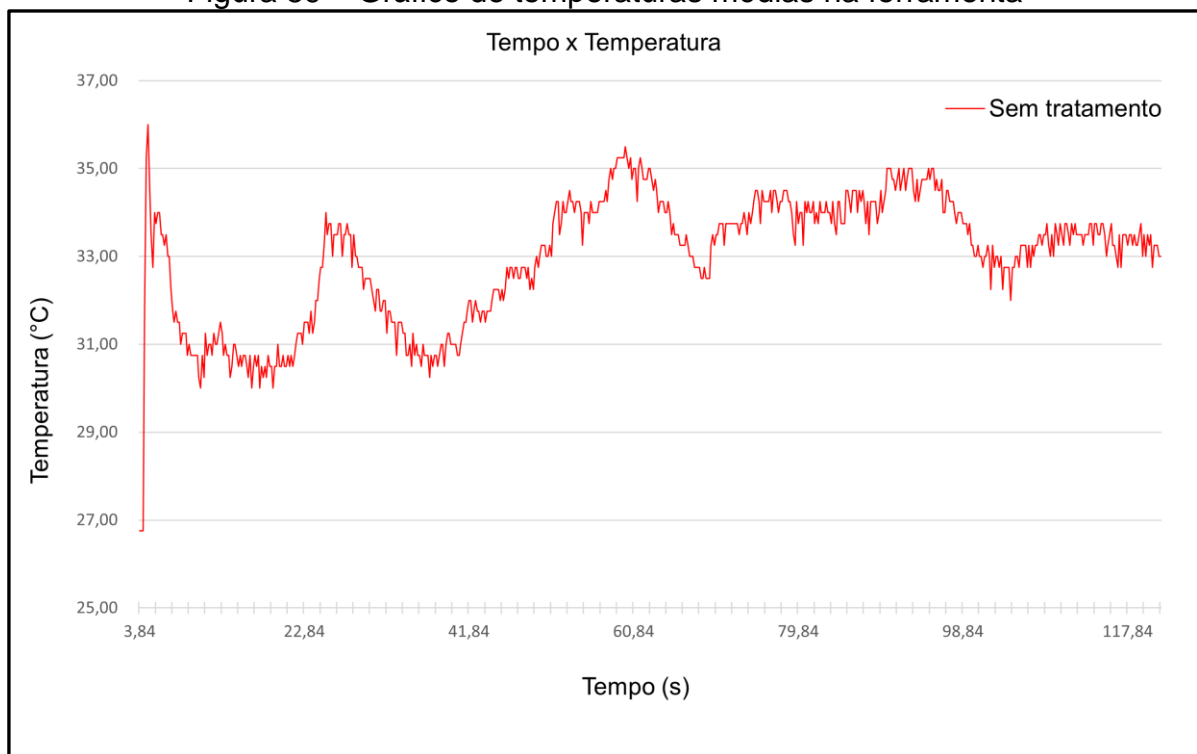
Após análise dos resultados apresentados anteriormente, é possível dizer que o tratamento do gume reduz a temperatura durante o fresamento e a distribuição de calor conforme Rodriguez (2009). Pois a principal função do tratamento é melhorar o escoamento de cavaco na interface cavaco-ferramenta e conseqüentemente o fluxo térmico do processo de remoção de material.

4.4 Temperaturas em ferramenta sem tratamento

Um dos objetivos deste trabalho era fazer medições para três tipos de ferramentas, variando somente seu tratamento de gume, porém conforme mencionado anteriormente, devido a falta de tempo útil para conclusão das furações para inserção de termopar, foi possível realizar somente ensaio com a fresa sem tratamento.

Portanto a seguir na figura 59 apresenta-se a curva térmica obtida para a medição planejada, foram utilizados mesmo parâmetros de usinagem que nos outros ensaios deste trabalho. Nota-se que o maior valor de temperatura adquirida equivale a 36 °C. A média geral de 32,98 °C calculada pode ser considerada para avaliação pois a medição é constante durante todo o processo.

Figura 59 – Gráfico de temperaturas médias na ferramenta



Fonte: O autor. (2023).

Como o termopar fica inserido em apenas um dos gumes, conclui-se que em estas variações de temperaturas altas e baixas na curva apresentada acima são provenientes do intervalo de tempo entre o contato do gume com termopar e o contato dos outros três.

5 CONCLUSÃO

Após finalização de todas as análises e estudos presentes neste trabalho, serão apresentadas as conclusões relacionadas as medições de temperatura realizadas na peça, aos desenvolvimentos de embutimento de termopares em ferramentas para futuras medições de temperatura e ao comportamento térmico do processo de usinagem de AISI P20 com fresas de metal duro.

Os resultados de temperaturas obtidos utilizando o método de termopar inserido à peça mostram que o comportamento das curvas de temperatura encontradas está coerente a outros trabalhos e ao esperado. Além disso, através das curvas de temperatura foram constatadas que os valores de temperaturas podem sofrer influência do desgaste, mesmo que pouco, e de possíveis fluxos ruins de escoamento de cavaco.

A fim de garantir confiabilidade e aumento de amostragem, foram refeitos alguns dos ensaios em que se identificaram divergências do padrão de comportamento esperado para as temperaturas, mesmo assim não foi possível repetir todos os ensaios fora do padrão devido à falta de tempo restante para desenvolvimento deste trabalho.

Ao comparar os gráficos gerais e valores de temperatura de cada tratamento de gume das ferramentas, conclui-se que o polimento por arraste influencia pouco nos valores de temperatura da peça já que estes estão mais interligados ao desgaste da aresta de corte, porém ao identificar menores valores de temperatura na peça, constata-se melhor distribuição de calor do processo e conseqüentemente menores valores de temperatura na ferramenta. Sendo assim, para os ensaios realizados, concluiu-se que o polimento com HSC 1/300 foi o tratamento de gume que mais contribuiu positivamente para o balanço térmico.

O maior desafio encontrado por este trabalho foi sem dúvida a realização do furo nas fresas para inserção de termopar. Para tal foi necessário desenvolvimento completo de um sistema confiável para furação utilizando eletroerosão.

Apesar de serem apresentados apenas os valores de temperaturas das ferramentas sem tratamento para este trabalho, ao analisar o comportamento de suas temperaturas é possível concluir que o método de medição de temperatura por termopar inserido à ferramenta utilizado é eficaz e contém dados coerentes com o esperado.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devida a grande dificuldade encontrada por este trabalho em desenvolver o método de furação de ferramentas utilizando equipamento de eletroerosão pertencente a esta instituição, sugere-se desenvolvimento de gabaritos para outros diâmetros de fresa. Conforme não foi possível durante este trabalho, recomenda-se também a utilização de termopares embutidos às fresas polidas com H 4/400 e HSC 1/300 em futuras medições de temperatura.

Além disso, após concluídas as etapas acima, pode ser desenvolvido um melhor comparativo entre os métodos de medição, termopar embutido à ferramenta e termopar embutido à peça. E também um comparativo da influência de diferentes parâmetros de usinagem sob temperaturas da peça e da ferramenta.

REFERÊNCIAS

- 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.
- 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*, v. 1, p. 190-195, 2012.
- DENKENA, B.; BIERMANN, D. **Effect of cutting edge preparation of coated tools on their performance in milling various materials**. *Cirp Annals*, [s.l.], v. 63, n. 7, p.264-273, 2014. Elsevier BV. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1755581714000224>. Acesso em: 20 out. 2022.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.; **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 1. ed. São Paulo, SP: MM Editora, 242 p. 1999.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 1. ed. São Paulo, SP: Editora Blucher, 801 p. 1970. E-book. ISBN 9788521214199. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Acervo/Publicacao/169177>. Acesso em: 25 set. 2022
- FRACARO, J. **Fabricação pelo processo de usinagem e meios de controle**. 1. ed. Curitiba, PR: Editora Intersaberes, 342 p. 2017. E-book. ISBN 9788559724899. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Acervo/Publicacao/128237>. Acesso em: 25 set 2022.
- GAITONDE, V. N. et al. **Machinability Evaluation in Hard Milling of AISI D2 Steel**. *Materials Research*, v. 19, n. 2, p. 360–369, mar. 2016.
- GRÄBNER, D.; ZIELINSKI, T.; VOVK, A.; RIEMER, O.; KARPUSCHEWSKI, B.; LANG, W. **An Investigation on High-Resolution Temperature Measurement in Precision Fly-Cutting**. *Sensors* 2021, 21, 1530.
- JIANG, F.; LIU, Z.; YANG, 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* 96, 1847–1858 (2018).
- KARAGUZEL U, BAKKAL M, BUDAK E (2016) **Modeling and measurement of cutting temperatures in milling**. *Procedia CIRP* 46:173–176.
- KIM, K.; LEE, W.; SIN, H., **A finite-element analysis of machining with the tool edge considered**. Disponível em: *Journal of materials processing technology* 86 (1999), S. 45-55

KLOCKE, F. **Manufacturing processes 1: Cutting**. Tradução de Aaron Kuchle. Aachen, Alemanha: Editora RWTH Aachen University, 523 p. 2011.

KLOCKE, F. **Manufacturing processes 2: Grinding, Honing, Lapping**. Tradução de Aaron Kuchle. Aachen, Alemanha: Editora RWTH Aachen University, 451 p. 2009.

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.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3. ed. São Paulo, SP: Editora Blucher, 409 p. 2015. E-book. ISBN 9788521208440. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Acervo/Publicacao/177884>. Acesso em: 21 out. 2022.

OKADA, M.; HOSOKAWA, A.; ASAKAWA, N.; UEDA, T. **End milling of stainless steel and titanium alloy in an oil mist environment**. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 74, p.1255–1266, 2014.

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

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*, v.40, p.713-738, 2000.

REBEYKA, C. J. **Princípios do processo de fabricação por usinagem**. 1. ed. Curitiba, PR: Editora Intersaberes, 292 p. 2016. E-book. ISBN 9788559720396. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Acervo/Publicacao/42171>. Acesso em: 25 set. 2022.

RODRÍGUEZ C. J. C., **Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing**. 2009. 205 f. Dissertação (Doutorado Profissional em Engenharia Mecânica) - Universidade de Kassel, Alemanha. 2009.

SCHMITT E.; ADAMATTI R. S. **Medição de temperatura em alta rotação**. 2022. 35 f. Trabalho acadêmico (Estágio em Engenharia Mecânica) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul. 2022.

STEMMER, C. E., **Ferramentas de Corte II: Brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos**. 4. ed. Florianópolis, Santa Catarina: Editora da Ufsc, 314 p. 2008.

TIKAL, F., **Schneidkantenpräparation: Ziele, Verfahren und Messmethoden**. Kassel University Press, 210 p. 2009.

TRENT, E. M. **Metal cutting and the tribology of seizure: II moviment of work material over the tool in metal cutting wear**. v.128, p.41-64, 1988b.

UHLMANN E., OBERSCHMIDT D., KUCHE Y., LÖWENSTEIN A., **Influence of cutting edge preparation on the performance of micro milling tools**. Procedia CIRP, 46:214–217, 210 p. 2016.

YAN, S.; ZHU, D.; ZHUANG, K.; ZHANG, X.; DING, H. **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, v. 214, p.2985-3001, 2014.

WORLDTOOLS. **Ferramentas em geral**, 2022. Disponível em: <https://www.worldtools.com.br/ferramentas-para-usinagem>. Acesso em: 09 out. 2022.

ZEILMANN, R. P.; BORDIN, F. M. **Effect of the cutting edge preparation on the surface integrity after dry drilling**. Procedia CIRP. 13. 103–107, 2014.

ZEILMANN, 2023. **Relatório prévio Projeto Otec**. UCS. 2023