



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



PAULO SÉRGIO PEREIRA MOREIRA

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE
CORTE NA GERAÇÃO DE CALOR NO PROCESSO DE
TORNEAMENTO DO AÇO SAE 1050**

**OURO PRETO - MG
2024**

Paulo Sérgio Pereira Moreira
paulo.spm@aluno.ufop.edu.br

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE
CORTE NA GERAÇÃO DE CALOR NO PROCESSO DE
TORNEAMENTO DO AÇO SAE 1050**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal de Ouro
Preto como requisito para a obtenção
do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Igor Cezar Pereira.

OURO PRETO – MG
2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M838e Moreira, Paulo Sergio Pereira.

Estudo experimental da influência dos parâmetros de corte na geração de calor no processo de torneamento do AÇO SAE 1050.

[manuscrito] / Paulo Sergio Pereira Moreira. - 2024.

53 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Igor Pereira.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Usinagem. 2. Temperatura. 3. Detectores - Termopar. 4. Usinagem - Parâmetros de corte. I. Pereira, Igor. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Paulo Sérgio Pereira Moreira

Estudo Experimental da Influência dos Parâmetros de Corte na Geração de Calor no Processo de Torneamento do aço SAE 1050

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel

Aprovada em 01 de Outubro de 2024

Membros da banca

[DSc] - Igor César Pereira - Orientador Universidade Federal de Ouro Preto
[DSc] - Diogo Antonio de Sousa - Universidade Federal de Ouro Preto
[DSc] - Edson Alves Figueira Junior - Universidade Federal de Ouro Preto

Igor César Pereira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 07/10/2024



Documento assinado eletronicamente por **Igor Cezar Pereira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/10/2024, às 17:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edson Alves Figueira Junior, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/10/2024, às 18:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Antonio de Sousa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/10/2024, às 17:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0790683** e o código CRC **2FD2CE6B**.

Agradeço a Deus que me deu força e coragem para enfrentar todos os desafios.

À minha família e amigos por todo apoio

AGRADECIMENTO

Primeiramente, agradeço a Deus, que me deu força, coragem e sabedoria para enfrentar os momentos mais difíceis. À minha família, especialmente aos meus pais, Sérgio e Dora, que acreditaram no meu sonho e caminharam ao meu lado em todos os momentos. Aos meus avós, Antônio, Onélia, Adriano e Aparecida, sou profundamente grato pelos ensinamentos de vida e, sobretudo, pelos valores de honestidade, hombridade, solidariedade e justiça. Agradeço também à Carol, por todo o apoio nesta caminhada, compartilhando tanto os momentos de alegria quanto os desafios. Aos meus tios, tias, primos e primas, que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando e dando forças, meu sincero obrigado.

“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor. Mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus não somos o que éramos”.

Martin Luther King

RESUMO

A usinagem tem um papel crucial na indústria, garantindo que as peças atendam às tolerâncias e geometrias especificadas. Durante o processo, a maior parte da energia gerada é transferida para o cavaco, no entanto, uma fração significativa é absorvida pela ferramenta de corte. Considerando o impacto do controle térmico no processo de usinagem para assegurar o desempenho ideal da ferramenta e a qualidade das peças fabricadas, é fundamental compreender e investigar a influência dos parâmetros de corte na geração de calor do processo. Por meio do estudo experimental, busca-se compreender a variação da temperatura em um processo de torneamento mediante a alteração dos parâmetros de corte. Para tal, foram realizados teste de temperatura utilizando da metodologia do termopar inserido para aquisição, comparação e verificação dos efeitos da variação dos parâmetros de corte na geração de calor. O objetivo deste estudo é avaliar como a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte influenciam a temperatura da ferramenta. Os resultados obtidos experimentalmente evidenciaram uma tendência do impacto direto desses parâmetros de corte na geração de calor durante o processo de torneamento influenciados pelo aumento da deformação plástica, cisalhamento e atrito.

Palavras-chave: Usinagem, Temperatura, Termopar inserido, Parâmetros de corte.

ABSTRACT

Machining plays a crucial role in industry, ensuring that parts meet specified tolerances and geometries. During the process, most of the energy generated is transferred to the chip, however, a significant fraction is absorbed by the cutting tool. Considering the impact of thermal control on the machining process to ensure optimal tool performance and the quality of manufactured parts, it is essential to understand and investigate the influence of cutting parameters on process heat generation. Through experimental study, we seek to understand the temperature variation in a turning process by changing the cutting parameters. To this end, temperature tests were carried out using the inserted thermocouple methodology to acquire, compare and verify the effects of varying cutting parameters on heat generation. The objective of this study is to evaluate how cutting speed, feed rate and depth of cut influence tool temperature. The experimentally obtained results showed a tendency towards the direct impact of these cutting parameters on heat generation during the turning process, influenced by the increase in plastic deformation, shear and friction.

Key-words: Machining, Temperature, Thermocouple inserted, Cutting parameters.

LISTA DE SIMBOLOS

W_{elast}	trabalho das forças que produzem deformações elásticas (W)
W_{disp}	trabalho das forças de dispersão (W)
W_{estrut}	trabalho das forças que modificam a estrutura cristalina do material (W)
W_{plast}	trabalho das forças que produzem deformações plásticas (W)
W_{cisal}	trabalho das forças que produzem o cisalhamento do material (W)
W_{atrito}	trabalho das forças que produzem atrito (W)
V_c	Velocidade de corte (m/min)
a_p	Profundidade de corte (mm)
f	Avanço (mm/volta)
f.e.m	força eletromotriz
Q	Quantidade de calor gerada (W)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação do torneamento.	6
Figura 2 - Áreas de aderência e escorregamento na interface cavaco-ferramenta.	7
Figura 3 – Zonas de geração de calor durante a formação de cavaco.	9
Figura 4 - Representação do calor dissipado durante a formação de cavaco no processo de usinagem.	10
Figura 5 - Ilustração mostrando a equivalência entre dois circuitos de termopares submetidos internamente a diferentes temperaturas.	11
Figura 6 - Desenho esquemático mostrando a inclusão de um condutor C em torno do sistema.	11
Figura 7 - Efeito da inserção de um material C em uma das junções, entre os ramos A e B de um termopar.	12
Figura 8 - Propriedade associativa da f.e.m entre materiais de um termopar.	12
Figura 9 - Propriedade associativa da f.e.m entre diferentes temperaturas das junções do termopar.	12
Figura 10 - Circuito Básico do termopar.	13
Figura 11 - Esquema representativo do termopar ferramenta-peça utilizando um contra ponto rotativo.	13
Figura 12 - Fluxograma de desenvolvimento do projeto.	17
Figura 13 - Fixação das juntas quentes no inserto da ferramenta de corte.	18
Figura 14 - bancada de teste montada.	19
Figura 15 – termômetro registrador de dados modelo RDXL4SD.	19
Figura 16 – Gráfico de temperatura por tempo.	23
Figura 17 - Pontos de outlier.	24
Figura 18 - Temperatura x tempo.	25
Figura 19 - Comparativo de velocidade.	28
Figura 20 -Comparativo de avanço.	30

Figura 21 - Comparativo de profundidade.32

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 – Variáveis e indicador.	20
Tabela 1 - Parâmetros de corte adotados durante os ensaios.....	22
Tabela 3 - Valores de temperatura para situação 1.....	25
Tabela 4 - Valores de temperatura para situação 2.....	26
Tabela 5 - Valores de temperatura para situação 3.....	26
Tabela 6 - Valores de temperatura para situação 4.....	27
Tabela 7 - Valores de temperatura para situação 5.....	27
Tabela 8 - Parâmetros de corte adotados para comparar velocidade.....	28
Tabela 9 - Parâmetros de corte adotados para comparar avanço.....	30
Tabela 10 - Parâmetros de corte adotados para comparar profundidade.....	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos.....	2
1.3.1	Geral	2
1.3.2	Específicos.....	2
1.4	Estrutura do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Processo de Usinagem.....	4
2.2	Interface cavaco-ferramenta	7
2.3	Temperatura na usinagem.....	7
2.3.1	Geração de Calor na Usinagem	8
2.3.2	Influência da geometria da ferramenta na geração de calor	10
2.4	Medição de temperatura por termopar.....	10
2.4.1	Termopar inserido.....	14
3	METODOLOGIA.....	16
3.1	Tipo de pesquisa	16
3.2	Materiais e Métodos	17
3.2.1	Fixação do termopar na ferramenta de corte	17
3.2.2	Aquisição de dados	19
3.3	Variáveis e indicadores.....	20
3.4	Instrumento de coleta de dados	20
3.5	Tabulação dos dados.....	20
3.6	Considerações finais do capítulo	21
4	RESULTADOS	22
4.1	Seleção dos dados	22
4.2	Velocidade de corte	27
4.3	Avanço.....	29
4.4	Profundidade.....	31
5	CONCLUSÃO.....	34

5.1	Conclusões.....	34
5.2	Recomendações	35
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....		36
ANEXO.....		38

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

O processo de usinagem é amplamente disseminado pela indústria, sendo responsável por garantir tolerâncias dimensionais e geométricas das peças. O avanço deste processo de fabricação teve como alicerce o estudo de fenômenos como temperatura, força, desgaste e acabamento superficial, dentre outros.

Segundo Ferraresi (2003), a usinagem é um processo de fabricação que gera cavaco ao modificar a peça, seja na forma, nas dimensões, no acabamento, ou em uma combinação desses três aspectos. O cavaco é, portanto, a porção de material removida da peça pela ferramenta de corte, podendo variar em forma, espessura e cor.

As características do cavaco retirado durante o processo de usinagem dizem muito sobre as condições de operação deste processo. Sua geometria e temperatura ajudam a terminar o limite de operação durante o processo. Machado et al. (2009), chama atenção para o fato de que o calor gerado durante as operações de usinagem pode trazer tanto benefícios quanto malefícios para o processo.

Costa (2015), salienta que, o calor envolvido durante o processo de usinagem é oriundo de praticamente toda a energia inserida no processo. A maior parte desse calor é transferida para o cavaco, mas uma parte significativa também é transferida para a ferramenta de corte.

O calor transferido para a ferramenta representa um inconveniente para o processo, segundo Machado et al. (2009), o aumento da temperatura interfere nas propriedades mecânicas do instrumento de corte, promovendo alterações na dureza e na tenacidade. Essas modificações nas características mecânicas da ferramenta tornam-se, portanto, um fator limitante nos processos de usinagem.

De acordo com a contextualização apresentada, a temperatura no processo de usinagem é uma condição determinante na produtividade. Deste modo, a questão problema do estudo é:

Como os parâmetros de corte influenciam na geração de calor durante o processo de torneamento de um aço SAE 1050?

1.2 Justificativa

A temperatura de corte é uma informação importante no processo de fabricação, sobretudo pelo fato desta ser uns dos principais limitadores deste processo, por impactar significativamente no desgaste da ferramenta de corte e por afetar na qualidade da operação e causar danos à peça. (TAYLOR, 1907)

O custo de produtividade na usinagem é medido pela quantidade de cavaco removido em um determinado tempo, sendo assim, elevados valores de velocidade de corte e/ou avanço são determinantes para diminuição dos gastos no processo. Entretanto, esses parâmetros são limitados por promover a redução radical da vida da ferramenta, especialmente quando operados em temperaturas elevadas (COELHO E DA SILVA, 2018).

Da Silva e Wallbank (1999), salienta que a quantidade de material retirado por tempo é diretamente proporcional ao calor transferido no processo, de modo que, quanto maior a potência de trabalho na produção de cavaco, maior será a temperatura nas proximidades da aresta de corte da ferramenta, ao passo que, quase toda energia consumida no processo é convertida em calor.

Posto isto, através da medição da temperatura no processo de usinagem, é possível identificar de forma quantitativa a relação que há entre os parâmetros de corte - como a velocidade de corte e avanço com o calor gerado no processo - sendo possível selecionar as melhores condições de operação, levando em consideração os custos de fabricação e a vida útil da ferramenta.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar o comportamento da temperatura da ferramenta e como esta é influenciada pelos parâmetros de corte no processo de torneamento de um aço SAE 1050.

1.3.2 Específicos

- Realizar a fundamentação teórica sobre: torneamento, interação do cavaco com a ferramenta, métodos de medição e análise da temperatura no processo de torneamento;
- Medir a temperatura da ferramenta de corte através do método do termopar inserido;

- Analisar a influência dos parâmetros de corte na geração de calor no processo de torneamento.

1.4 Estrutura do Trabalho

Essa monografia está dividida em cinco capítulos conforme os seguintes tópicos:

No primeiro capítulo será apresentada a introdução, justificativa para a realização do trabalho, bem como os objetivos gerais e específicos.

Já no segundo capítulo será apresentada a revisão bibliográfica contemplando as temáticas que circundam este trabalho; processo de torneamento; parâmetros de corte-temperatura, métodos de medição de temperatura no torneamento e o método termopar ferramenta-peça.

O terceiro capítulo contempla a metodologia utilizada para medir a temperatura na interface cavaco ferramenta, bem como os instrumentos utilizados para medição e também para calibração do termopar.

O quarto capítulo aborda os resultados obtidos, bem como as discussões acerca da metodologia aplicada.

No quinto capítulo serão apresentadas as considerações finais acerca dos resultados obtidos no experimento, além de recomendações de futuras pesquisas sobre a temática.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de Usinagem

Segundo FERRARESI (2003), torneamento é um “processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo.”. Ainda na concepção do autor, o torneamento pode ser classificado de acordo com o movimento realizado pela ferramenta de corte frente ao eixo principal de rotação da máquina, sendo eles:

- Torneamento retilíneo:

- Cilíndrico - processo na qual a ferramenta de corte desloca em uma trajetória linear e paralela ao eixo principal de rotação da máquina, podendo ter as configurações;

- Externo - processo realizado na parte externa do tarugo a ser usinado - Fig.1-A;
- Interno - processo realizado na parte interna do tarugo a ser usinado - Fig.1-B;
- Sangramento axial - processo que busca obter entalhe circular na face perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina - Fig.1-C.

- Cônico - processo cuja a ferramenta percorre uma trajetória inclinada ao eixo principal de rotação da máquina, podendo estar disposto em:

- Externo - Fig.1- D;
- Interno - Fig.1- E.

- Radial - processo em que a trajetória da ferramenta de corte é perpendicular ao eixo de rotação da máquina, tendo duas configurações base:

- Faceamento - quando se deseja obter uma superfície plana - Fig.1- F.
- Sangramento radial - quando se deseja obter um entalhe circular - Fig.1- G.

- Perfilamento - deslocamento da ferramenta de corte de forma radial ou axial:

- Radial - Fig.1- H;
- Axial - Fig.1- I.
- Torneamento curvilíneo - Fig.1-J
 - Torneamento de desbaste - Processo que antecede ao torneamento de acabamento, tendo como finalidade promover a peça uma forma dimensional próximas aos valores solicitados.
 - Torneamento de acabamento - processo que garante o acabamento superficial e /ou dimensional final especificado da peça.

A Figura 1 ilustra os tipos de configurações de torneamento:

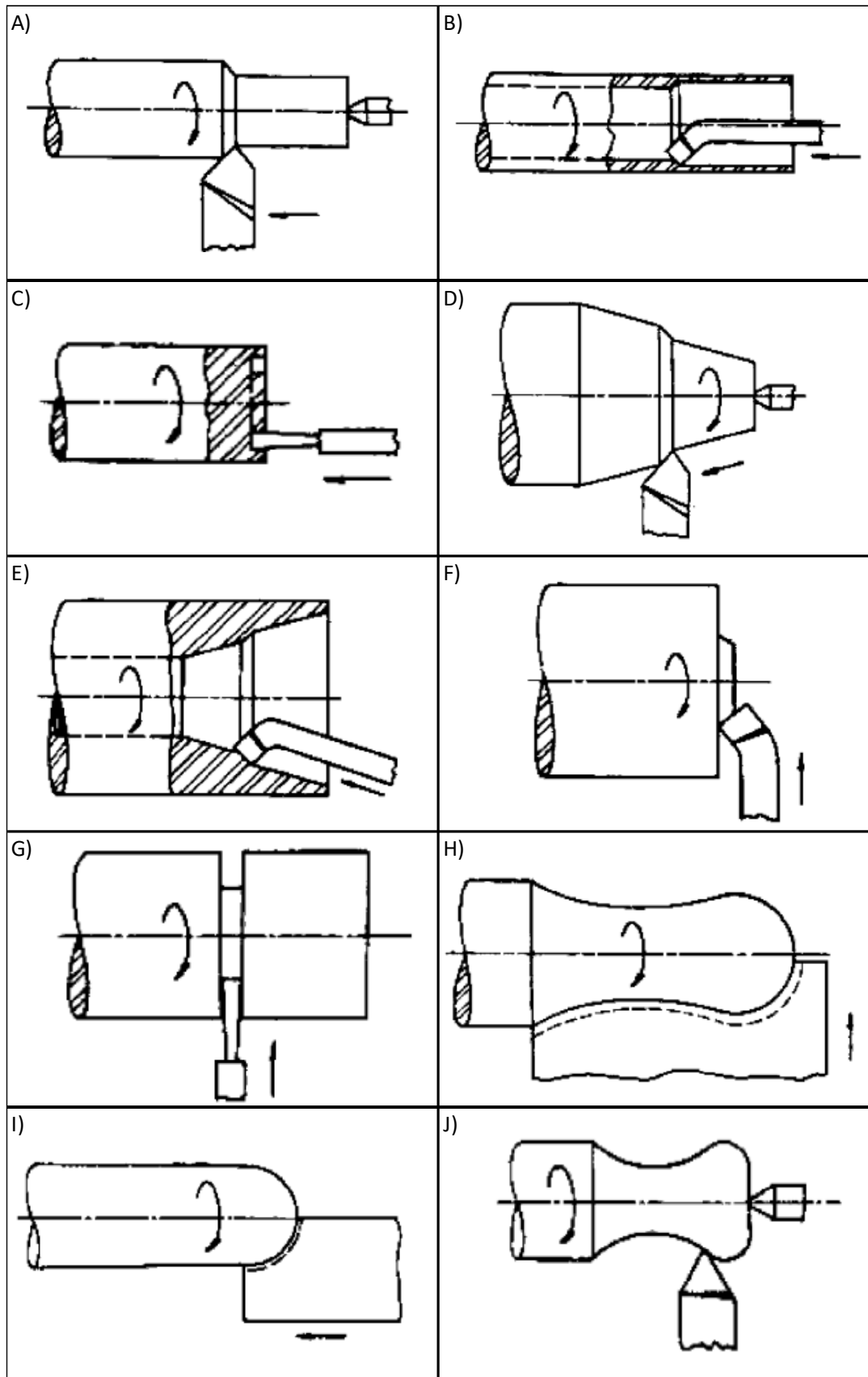


Figura 1 – Classificação do torneamento.
 Fonte: adaptado Ferraresi (2003)

2.2 Interface cavaco-ferramenta

As condições em que o cavaco percorre a ferramenta de corte são determinantes para o processo de usinagem. A zona de interface cavaco ferramenta é de suma importância não apenas para a formação do cavaco, mas, também para a força de usinagem, a geração de calor durante o processo, o desgaste da ferramenta e a temperatura de corte. (MACHADO, 2004)

Segundo Trent (1963), as condições de interface cavaco ferramenta são determinadas por uma zona de aderência e uma zona de escorregamento, sendo a primeira condição uma extensão da aresta de corte até a superfície de saída da ferramenta. Já a zona de escorregamento, a determinação ocorre ao longo da periferia da ferramenta. Na Fig. 2 ilustra-se a área de formação destas zonas na interface cavaco ferramenta, na qual o segmento da reta BC representa a zona de aderência e o CD a zona de escorregamento.

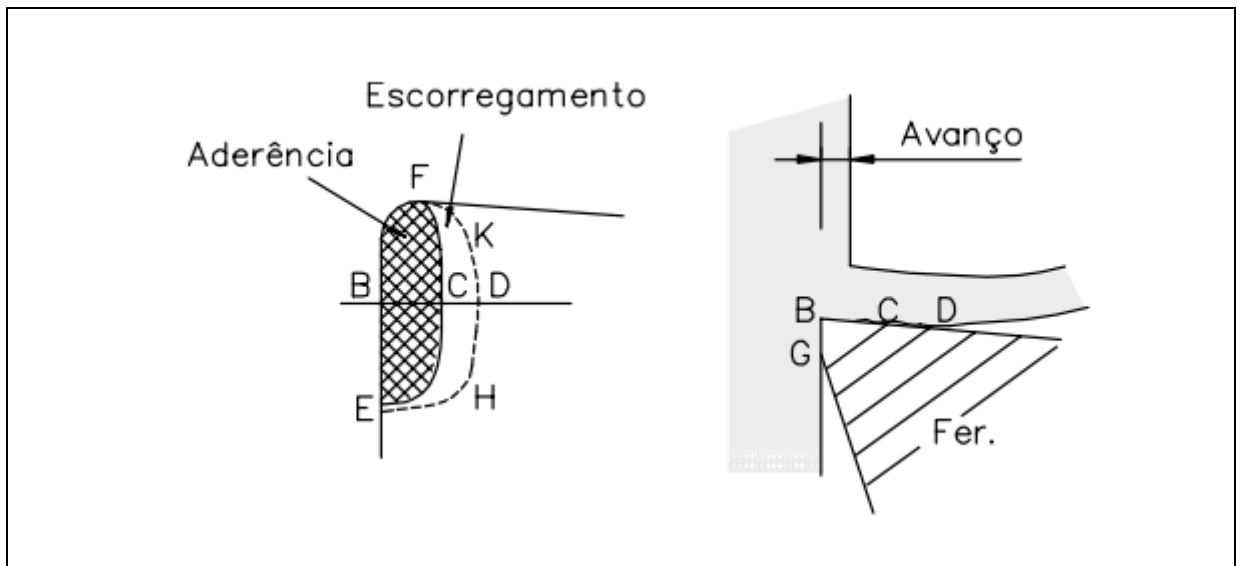


Figura 2 - Áreas de aderência e escorregamento na interface cavaco-ferramenta.
Fonte: Trent e Wright (2000).

2.3 Temperatura na usinagem

De acordo com Machado et al. (2011), o trabalho exercido pela força de usinagem provoca deformações, principalmente na peça, mas, também atua na ferramenta de corte, sendo que a energia utilizada para promover as deformações e atritos do processo são convertidos em calor.

O trabalho total de corte exercido na usinagem é uma somatória de sub trabalhos realizados durante o processo expressado pela equação 1:

$$W_{CORTE} = W_{elast} + W_{disp.} + W_{estrut.} + W_{plast.} + W_{cisal} + W_{atrito}$$

onde,

W_{elast} = trabalho resultante das deformações elásticas que ocorrem na ferramenta, peça, cavaco e máquina.

W_{disp} = trabalho resultante de dispersão oriundos do deslocamento dos grãos cristalinos para o cavaco, esmagamento de alguns grãos e principalmente pela superação da energia superficial que existe entre cavaco e ferramenta.

W_{estrut} = Trabalho resultante das forças que agem na modificação da estrutura cristalina do material.

W_{plast} = Trabalho resultante das forças que atuam no cavaco causando a deformação plástica do mesmo

W_{cisal} =Trabalho resultante das forças que causam o cisalhamento do material da peça produzindo o cavaco, além dos consequentes deslizamentos internos do cavaco durante sua passagem pela superfície da ferramenta.

W_{atrito} = Trabalho resultante das forças aplicadas para superar o atrito existente entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta e o atrito entre a superfície de folga da ferramenta e a peça.

Segundo Ferraresi (1977), a equação 1 pode ser resumida nas três últimas parcelas, sendo elas: os $W_{plast.}$, $W_{cisal.}$, W_{atrito} por serem as variáveis que mais demandam trabalho durante o processo de usinagem, sendo que, do total de trabalho consumido durante o processo, cerca de 90 % do trabalho mecânico é transformado em calor.

2.3.1 Geração de Calor na Usinagem

De acordo com Machado et al. (2011), durante o processo de usinagem uma grande parcela do calor é formada principalmente na zona de corte e pode ser dividida entre três fontes, sendo elas: zona de cisalhamento primária, zona de cisalhamento secundária; zona de cisalhamento terciária, representada pela Fig. 4. Segundo o autor, o aumento da temperatura nesta zona de corte se dá pela deformação plástica do cavaco e os atritos envolvidos neste processo.

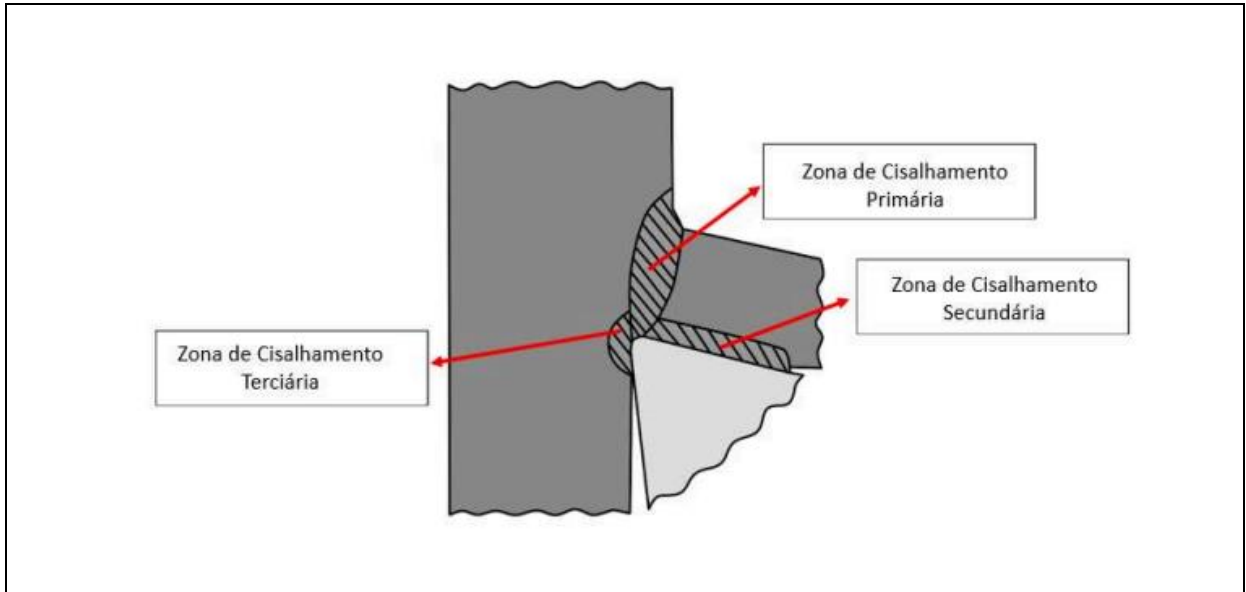


Figura 3 – Zonas de geração de calor durante a formação de cavaco.
Fonte: adaptado Machado et al. (2011).

- **Zona de cisalhamento primária**

Segundo Machado et al (2011), a zona de cisalhamento primário é compreendida pela primeira região próxima à peça e a interface cavaco ferramenta, e é caracterizada por apresentar as máximas tensões e deformações plásticas na peça, onde encontra-se o plano de cisalhamento. Nesta faixa de cisalhamento o calor gerado é proveniente dos distúrbios provocado pelas movimentações entres os átomos do material da peça no instante que ocorre a deformação plástica.

- **Zona de cisalhamento secundária**

De acordo com Trent e Wright (2000), a zona de cisalhamento secundária é caracterizada por apresentar tensão e geração de calor elevadas, podendo ultrapassar valores de 1000°C. Machado et al (2011), determina essa zona como sendo a região compreendida pelo contato do fluxo do material do cavaco com a ferramenta de corte, e define que o calor gerado nesta região é categórico para a vida da ferramenta, sendo que, a temperatura desta área é diretamente proporcional aos parâmetros de velocidade de corte, de modo que o aumento da velocidade de corte implica no aumento da temperatura de corte.

- **Zona de cisalhamento terciária**

De acordo com Machado et al (2011), a zona de cisalhamento terciária é a região compreendida pelo contato de atrito entre a superfície de folga da ferramenta de corte e a peça

e, além disso, pela área que ocorre o cisalhamento interno da peça provocado pela aderência do cavaco na superfície da ferramenta. A Fig.5 ilustra as dissipações de calor no processo de usinagem.

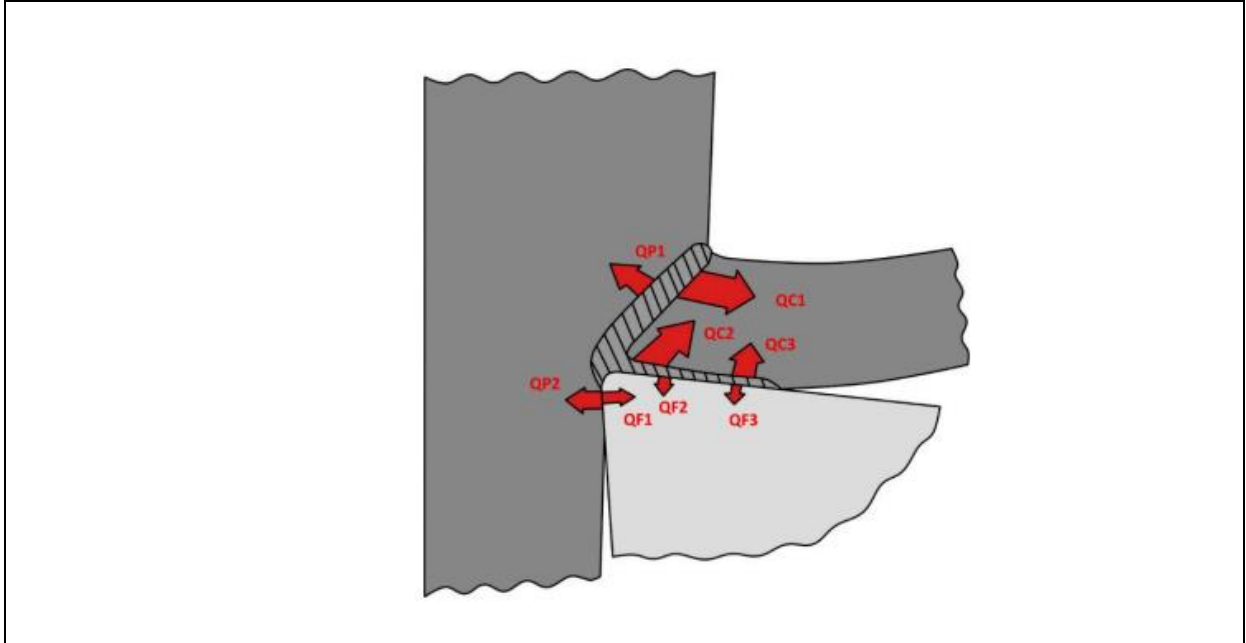


Figura 4 - Representação do calor dissipado durante a formação de cavaco no processo de usinagem. Fonte: adaptação de Ferraresi (1977).

2.3.2 Influência da geometria da ferramenta na geração de calor

Segundo Machado et al (2011), o formato da ferramenta de corte interfere na formação do calor gerado durante o processo de usinagem, de modo que cada ângulo da ferramenta atua de maneira diferente na geração do calor.

De acordo Pradeepfumar et al., (2015), o ângulo de saída, que varia entre -8° a 20° , é um dos principais parâmetros da geometria da ferramenta para o controle da geração de calor durante o processo de usinagem, sendo que ângulo de saída positivos são determinantes para a diminuição do calor gerado no processo, todavia, para esta configuração de ângulo há um enfraquecimento da ferramenta.

2.4 Medição de temperatura por termopar

- **Lei dos termopares**

De acordo com Doebelin(1990), e Taylor (1988), o método de mediação termopar é baseado em 5 leis fundamentais apresentadas a seguir:

Primeira lei: A força eletromotriz de um circuito termopar, cujas junções são sujeitas a temperaturas T_1 e T_2 , respectivamente, é independente das demais temperaturas ao longo do circuito, desde que os materiais condutores A e B sejam homogêneos. A Fig. 6 ilustra a 1ª lei:

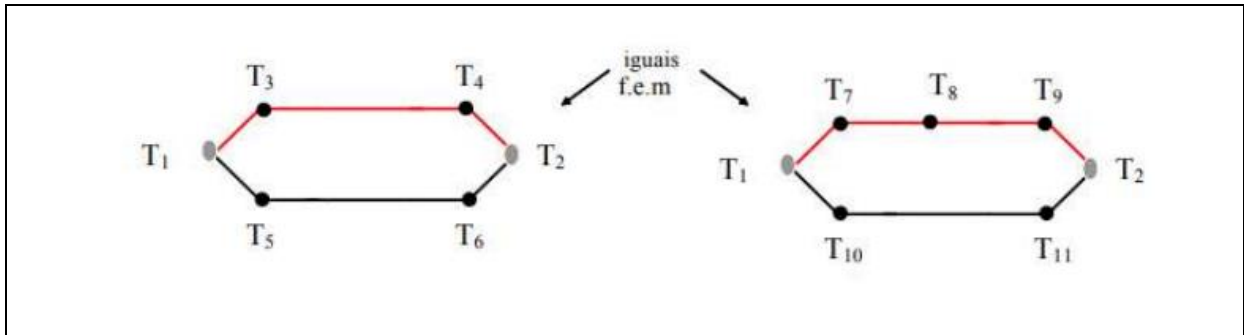


Figura 5 - Ilustração mostrando a equivalência entre dois circuitos de termopares submetidos internamente a diferentes temperaturas.

Fonte: Kaminise (2012).

Segunda lei: Se um terceiro condutor C for inserido no sistema entre A e B, e suas junções forem mantidas a uma mesma temperatura T_3 , a força eletromotriz (f.e.m) continuará inalterada, independentemente de qualquer variação de temperatura ao longo de toda a extensão de C. A Fig. 7 ilustra a 2ª lei:

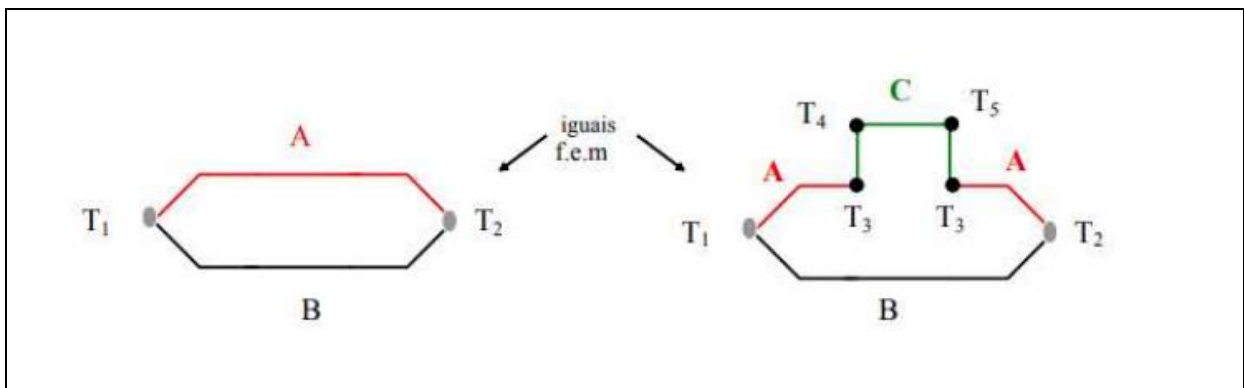


Figura 6 - Desenho esquemático mostrando a inclusão de um condutor C em torno do sistema.

Fonte: Kaminise (2012).

Terceira lei; se um material C for adicionado nas junções entre A e B, e houver diferenças de temperatura ao longo do sistema, a força eletromotriz (f.e.m) permanece constante, contanto que essas diferenças de temperatura não ocorram nas junções AC e BC, que estão sujeitas à mesma temperatura T_1 . A Fig. 8 ilustra a 3ª lei:

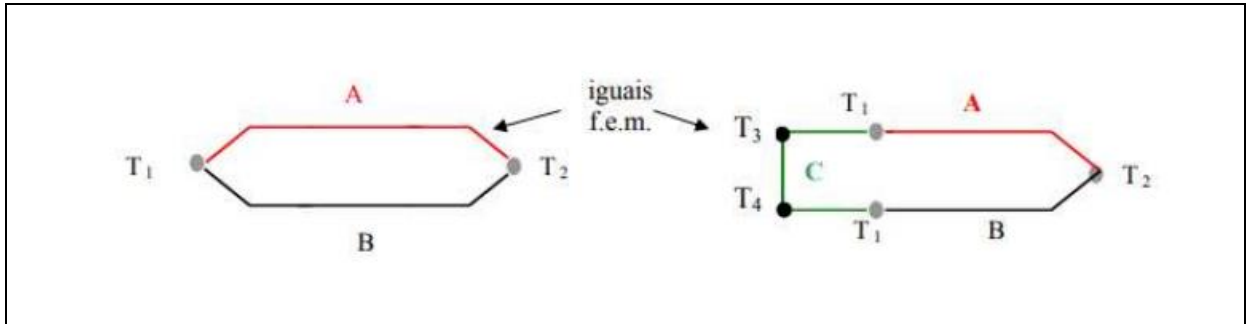


Figura 7 - Efeito da inserção de um material C em uma das junções, entre os ramos A e B de um termopar
Fonte: Kaminise (2012).

Quarta lei: A força eletromotriz (f.e.m) entre os metais A e C seja E_{ac} , e entre os metais B e C seja E_{bc} , então, a f.e.m entre os metais A e B é igual a $E_{ac} + E_{bc}$. A Fig. 9 ilustra a 4ª lei:

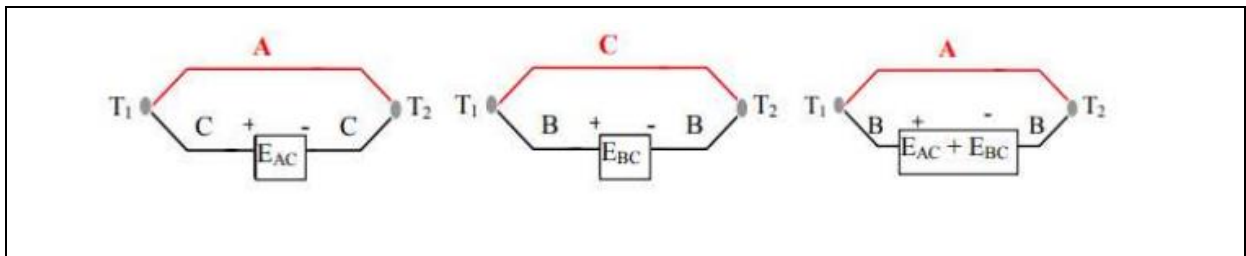


Figura 8 - Propriedade associativa da f.e.m entre materiais de um termopar.
Fonte: Kaminise (2012).

Quinta lei: Quando as junções do termopar estão sujeitas às temperaturas T_1 e T_2 , é gerada uma força eletromotriz (f.e.m) E_1 , e quando estão submetidas às temperaturas T_2 e T_3 , é gerada uma f.e.m E_2 . Portanto, ao ser submetido às temperaturas T_1 e T_3 , o sistema do termopar produzirá as f.e.m E_1 e E_2 , respectivamente. A Fig. 10 ilustra a 5ª lei:

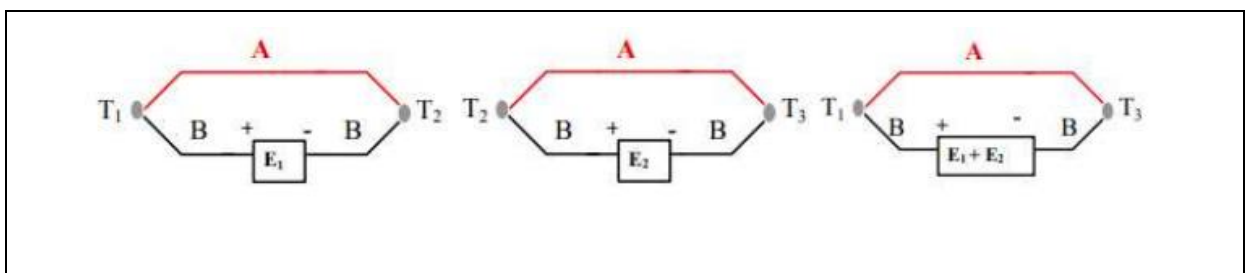


Figura 9 - Propriedade associativa da f.e.m entre diferentes temperaturas das junções do termopar.
Fonte: Kaminise (2012).

- **Sistema termopar Ferramenta-Peça**

Segundo Lima Junior (2020), a técnica de medição por termopar ferramenta-peça é baseada no princípio de funcionamento de um termopar convencional, no qual dois materiais diferentes ao possuírem uma conexão elétrica denominada como junta formam uma força

eletromotriz quando submetidas a uma diferença de temperatura, como estabelecido na lei de Seebeck. A Fig. 11, ilustra o circuito de um termopar:

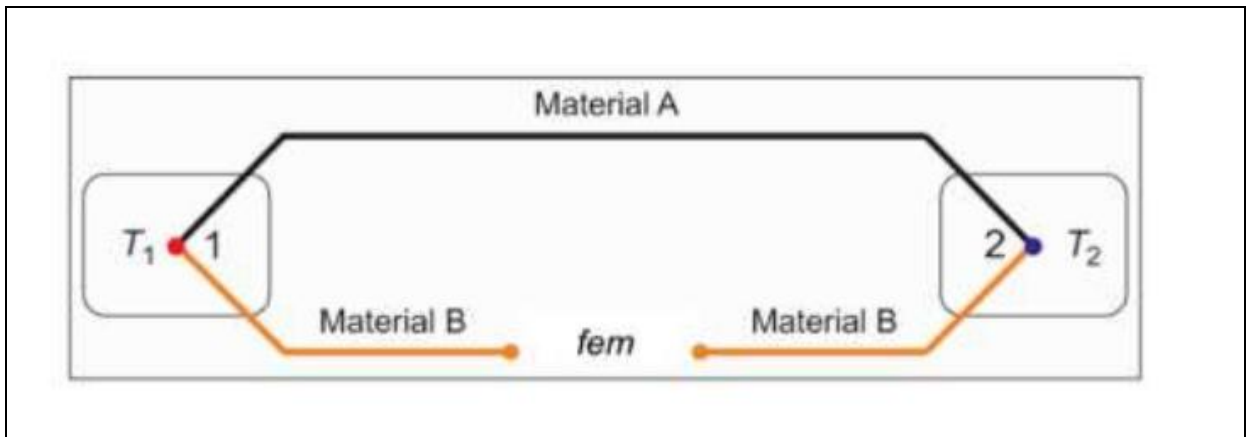


Figura 10 - Circuito Básico do termopar.
Fonte: Lima Junior (2020).

Segundo Machado et al (2011), é possível montar um circuito em uma bancada para fazer a medição da temperatura de usinagem. A Fig.12 mostra um exemplo termopar ferramenta peça utilizando um contra ponto rotativo.

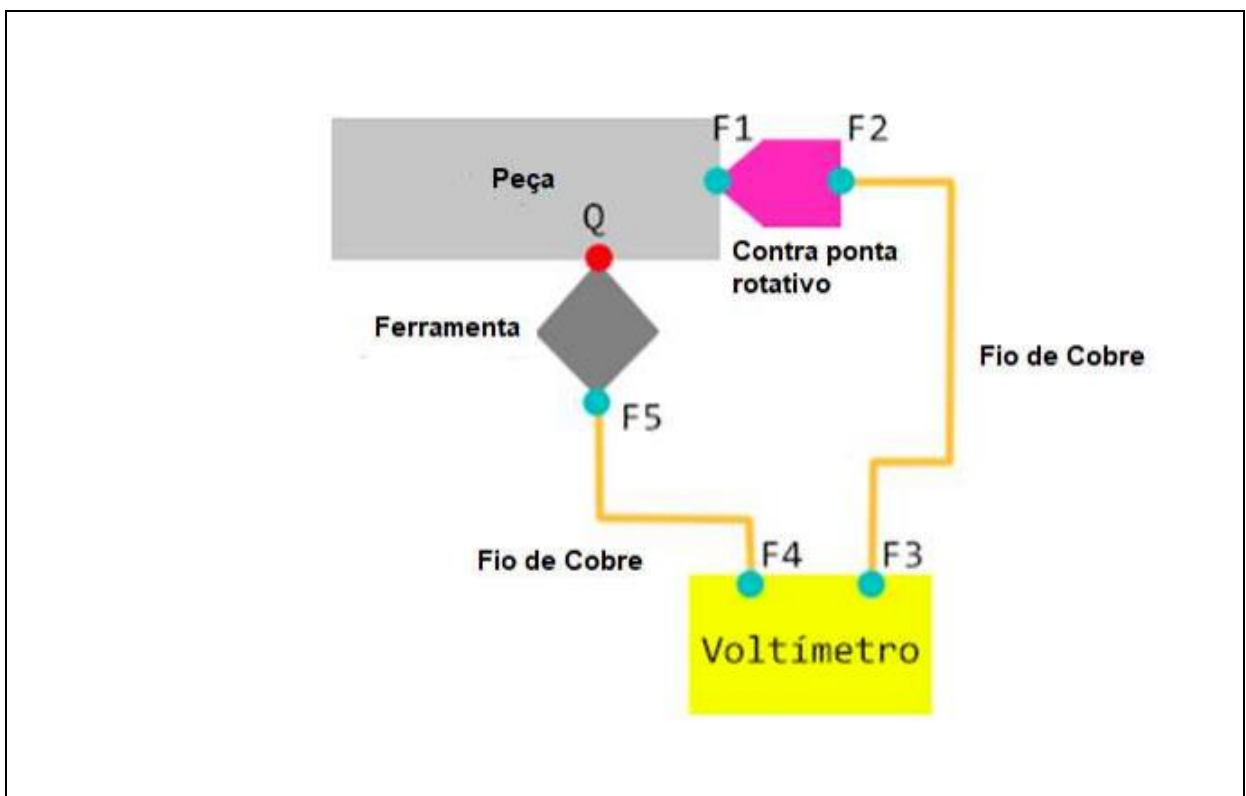


Figura 11 - Esquema representativo do termopar ferramenta-peça utilizando um contra ponto rotativo.
Fonte: Machado et al (2011)

Onde:

Q= Junta quente - responsável por reproduzir a temperatura gerada na usinagem

F1;F2;F3;F4 e F5= juntas fria.

De acordo com Leshoch;Shin(1997), o experimento de medição de temperatura deve ter alguns cuidados para que seja o mais fidedigna possível. Dentre eles, tem se:

- O conjunto ferramenta-peça deve ser composto por condutores elétricos,
- Todo o sistema precisa ser adequadamente isolado eletricamente.
- A medição da força eletromotriz é realizada pelo termopar, mas a calibração pode apresentar desafios
- É crucial considerar as forças eletromotriz parasitas que surgem devido às juntas secundárias no sistema.

Segundo Kaminise (2012), a principal maneira para minimizar o efeito de forças eletromotrizes parasitas é garantir que a temperatura das juntas frias esteja na mesma temperatura, todavia, para juntas de materiais diferentes, manter a temperatura para juntas de materiais diferentes, torna-se uma tarefa mais difícil.

2.4.1 Termopar inserido

Os métodos experimentais, embora exijam um longo tempo de preparação e envolvam altos custos devido ao uso de equipamentos e materiais, ainda são os mais utilizados para medir a temperatura de usinagem com precisão. Isso se deve à confiabilidade das informações obtidas, tornando-os, portanto, excelentes para validar modelos analíticos e numéricos que determinam a temperatura de usinagem (BENABID et al., 2014).

O princípio de funcionamento de um termopar inserido baseia-se no efeito Seebeck, que gera uma força eletromotriz (f.e.m.) quando dois materiais condutores diferentes são unidos e suas extremidades apresentam uma diferença de temperatura. A magnitude dessa f.e.m. gerada depende diretamente dos materiais do termopar. Assim, o conjunto de termopares incorporado na ferramenta de corte ou na peça é denominado termopar inserido (LIMA, 2017).

De acordo com Sutter et al. (2003), o método de medição por termopar inserido oferece inúmeras vantagens, especialmente pela facilidade de construção dos termopares, aliado ao baixo custo e à simplicidade de funcionamento. Todavia, a localização do termopar é uma das principais deficiências deste método. Para obter uma estimativa precisa da temperatura da superfície da ferramenta, é necessário posicionar o termopar muito próximo da aresta de corte. No entanto, para esse posicionamento são realizados micro furos no inserto,

que podem alterar a condução de calor da ferramenta e o valor medido da temperatura, além de enfraquecer a aresta de corte (Komanduri e Hou, 2001).

O termopar inserido apresenta uma boa aproximação dos valores de temperatura do plano de cisalhamento e da interface cavaco-ferramenta, através da superfície da saída, todavia esse método não possibilita a realização da aferição da temperatura na região da interface cavaco e ferramenta (MACHADO *et al.*, 2009).

Kus (2015), comparou as temperaturas obtidas na usinagem de um aço AISI 4140 usando o método de sensor infravermelho e o método do termopar inserido na ferramenta, sendo o termopar do tipo K e posicionado a 1 mm da aresta de corte. As temperaturas variaram entre 390°C e 525°C para o sensor infravermelho, e entre 57°C e 83°C para o termopar.

Pereira (2022), realizou um estudo comparando as temperaturas obtidas no torneamento de um aço ABNT 4140, utilizando o método do termopar ferramenta-peça. As menores temperaturas foram registradas para os menores valores de velocidade de corte e avanço, sendo a menor temperatura de 719 °C. Para os maiores valores de velocidade de corte e avanço ($v_c = 163$ m/min e $f = 0,15$ mm/rev), a temperatura registrada foi de 840 °C.

Lima (2017) também realizou um estudo sobre a influência dos parâmetros de corte na geração de calor durante o processo de usinagem, utilizando o método do termopar ferramenta-peça em um processo de fresamento de aço ABNT D2. Os menores valores de temperatura foram registrados para $v_c = 60$ m/min, $f = 0,1$ m/rev e $a_p = 1$ mm, sendo a temperatura de 76° C. Entretanto, para condições mais severas, com $v_c = 180$ m/min, $f = 0,2$ m/rev e $a_p = 2$ mm, foi registrada uma temperatura de 185° C.

3 METODOLOGIA

Este capítulo aborda a metodologia utilizada para o estudo experimental do comportamento da temperatura durante o processo de torneamento, colocando-se em prática conceitos, fundamentos e procedimentos observados na revisão bibliográfica, a fim de determinar o comportamento da temperatura durante o processo de usinagem.

3.1 Tipo de pesquisa

De acordo com Gil (2002), a pesquisa representa um procedimento racional sistemático de investigação que visa obter respostas para problemas específicos, empregando métodos científicos. Segundo Gil (2017, p.17), as pesquisas podem ser definidas como:

A pesquisa é desenvolvida mediante o concurso dos conhecimentos disponíveis e a utilização cuidadosa de métodos e técnicas de investigação científica. Na realidade, a pesquisa desenvolve-se ao longo de um processo que envolve inúmeras fases, desde a adequada formulação do problema até a satisfatória apresentação dos resultados.

A pesquisa científica pode ser classificada de acordo com os objetivos, essas podem ter caráter exploratório, descritivo ou explicativo. As pesquisas exploratórias têm como objetivo principal realizar a exploração do problema, bem como entender as ideias e elementos que o envolvem, a fim de elaborar hipóteses. A descritiva, no entanto, procura descrever as principais características do problema base e estabelecer relações entre suas variáveis. Ao final, a pesquisa de cunho explicativa busca identificar os fatores que ocasionam ou corroboram para a ocorrência do evento, identificando as causas-raiz do fenômeno (GIL,2017).

Outrossim, as pesquisas podem ser classificadas quanto a forma de abordagem, tendo como características, serem quantitativa ou qualitativa. A pesquisa qualitativa descreve o fenômeno baseado na interpretação de elementos não mensuráveis, já a pesquisa quantitativa busca atrelar os dados do fenômeno a partir de elementos mensuráveis e teóricos. (GIL, 2017; CRESWELL, 2021).

De acordo com a contextualização apresentada, este trabalho trata-se de uma pesquisa de cunho exploratório com uma abordagem quantitativa, uma vez que busca entender os elementos que envolve o fenômeno da temperatura no torneamento pela análise bibliográfica e posteriormente pela mensuração da temperatura no processo através do método de medição termopar inserido.

Os procedimentos técnicos utilizados para a elaboração deste trabalho incluem pesquisas bibliográficas e experimentais. O experimento será realizado em um torno CNC, com um termopar inserido na ferramenta de corte.

3.2 Materiais e Métodos

O desenvolvimento deste trabalho seguirá o fluxograma apresentado na Figura 19.

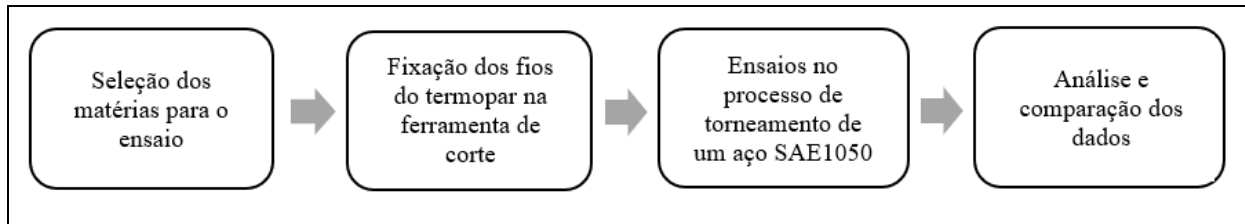


Figura 12 - Fluxograma de desenvolvimento do projeto
Fonte: Pesquisa Direta (2024)

Com base no fluxograma apresentado, inicialmente, foram realizadas tentativas de soldar os fios do termopar no inserto da ferramenta de corte. No entanto, devido à baixa soldabilidade do inserto cerâmico, algumas adaptações foram necessárias. Utilizaram-se os mecanismos de fixação do inserto na ferramenta de corte como apoio para fixar as juntas quentes do termopar.

Em um segundo momento, a ferramenta foi fixada na mesa do CNC e, posteriormente, foram realizados os ensaios de torneamento, variando as condições de operação do torno. Isso gerou dados que foram tratados e processados para, finalmente, serem analisados. Abaixo, segue o detalhamento de cada etapa do procedimento.

3.2.1 Fixação do termopar na ferramenta de corte

A fixação do termopar teve como base as metodologias mencionadas na revisão bibliográfica do termopar inserido com utilização do princípio do efeito Seebeck, fixando as juntas quentes no inserto da ferramenta de corte em dois pontos e ligando as juntas frias em um termômetro registrador de dados de quatro canais modelo RDXL4SD. A figura 13 ilustra a fixação das juntas quentes do termopar na ferramenta de corte.

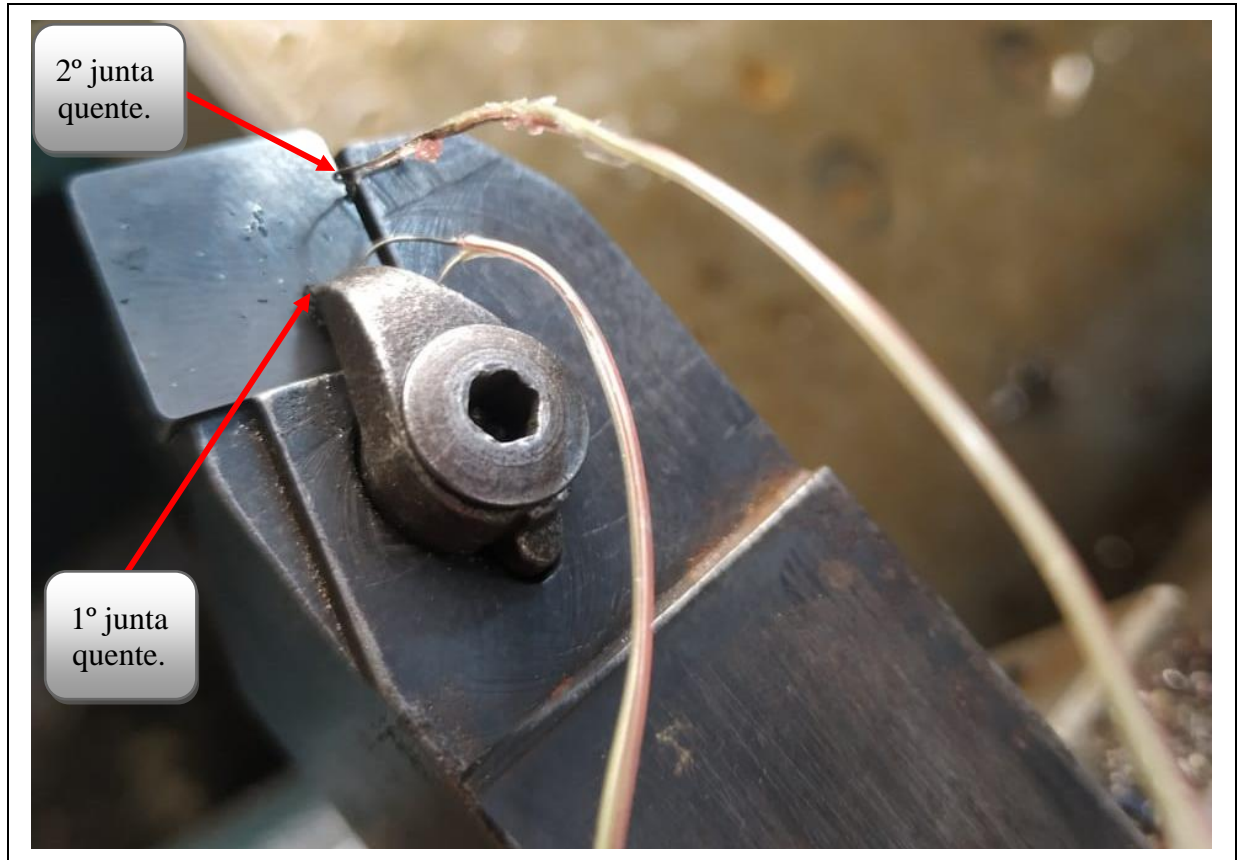


Figura 13 - Fixação das juntas quentes no inserto da ferramenta de corte
Fonte: Pesquisa direta (2024)

As juntas foram fixadas mecanicamente, aproveitando o sistema de fixação do suporte da ferramenta. A primeira junta quente foi fixada na ponta do grampo que parafusa o inserto, enquanto a segunda junta quente ficou apoiada entre o inserto e o suporte da ferramenta de corte, próximo à superfície de saída da ferramenta.

Os ensaios foram realizados utilizando um torno CNC modelo Romi Centur 30D, uma barra de SAE 1050 com \varnothing externo de 51,2 mm x 317 mm, e um termopar inserido na ferramenta. O sistema de medição foi composto por um termômetro registrador, um metro de fio para termopar, dois conectores tipo K, e fita adesiva para acomodar os fios do termopar, conforme indicado na Figura 14. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), em Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

Como demonstrado na Figura 14, foram utilizados apenas dois canais de leitura para as juntas quentes 1 e 2. Os dados obtidos pelo equipamento foram armazenados no cartão de memória, e o intervalo de tempo entre cada leitura de temperatura foi configurado para um segundo.

3.3 Variáveis e indicadores

Variáveis é o objetivo principal da pesquisa e é denominada como sendo um conceito operacional dotado de um valor numérico que pode sofrer alterações. Os indicadores, por sua vez, são medidas concretas que evidenciam a existência e a variação de uma variável (GIL,2002).

Segundo Takashina e Flores (1997 p.19), indicadores podem ser definidos como sendo: “indicadores são formas de representação quantificáveis das características de produtos e processos”, o autor ainda acrescenta que estes são utilizados para fazer o controle de qualidade do estudo das variáveis.

Sendo assim, a tabela 2 representa as variáveis e indicadores relevantes do presente trabalho:

Tabela 1 – Variáveis e indicador.

Variável	Indicador
Velocidade de corte	Temperatura
Profundidade	
Avanço	

Fonte: Pesquisa direta (2024)

3.4 Instrumento de coleta de dados

A aquisição de dados tem por base a revisão bibliográfica da literatura existente, além dos dados obtidos experimentalmente pelo método de termopar inserido.

3.5 Tabulação dos dados

Os dados obtidos durante os experimentos são organizados, padronizados e analisados no programa Microsoft Excel.

3.6 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo, foram apresentados e detalhados os equipamentos utilizados para conduzir o estudo, desenvolver a adaptação da ferramenta de corte e realizar os experimentos mencionados nesta pesquisa. No próximo capítulo serão apresentados os resultados e as discussões da pesquisa sobre o efeito dos parâmetros de corte na geração de calor no processo de torneamento.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados adquiridos após os ensaios de temperatura realizados durante o torneamento de um aço SAE 1050, com as configurações de processo proposta na base bibliográfica e a análise preliminar dos dados obtidos. Os resultados são organizados pelas condições de operação do torno CNN, e em um segundo momento serão apresentados o comparativo de cada processo.

4.1 Seleção dos dados

Os dados obtidos foram armazenados em um cartão de memória do termômetro registrador em formato de planilha e posteriormente processados no Excel. Durante os ensaios, foi utilizado um tempo de amostragem de um segundo, registrando a temperatura do processo a cada segundo de torneamento.

Os ensaios foram realizados com variações nas condições de corte, conforme apresentado na Tabela 1 abaixo. As variáveis do processo de torneamento que foram alteradas incluíram a velocidade de corte, o avanço e a profundidade.

Tabela 2 - Parâmetros de corte adotados durante os ensaios.

VARIÁVEIS	SITUAÇÃO 1	SITUAÇÃO 2	SITUAÇÃO 3	SITUAÇÃO 4	SITUAÇÃO 5
Velocidade (Vc)	200 m/min	100 m/min	100 m/min	100 m/min	100 m/min
Avanço (f)	0.2 mm/volta	0.2 mm/volta	0.1 mm/volta	0.3 mm/volta	0.2 mm/volta
Profundidade (Ap)	0.5 mm	0.5 mm	0.5 mm	0.5 mm	1 mm

Fonte: Pesquisa direta (2024)

Adotando os parâmetros de corte da Tabela 1, foram realizados quinze ensaios, com três repetições para cada condição. O percurso da ferramenta de corte foi padronizado em 50 mm, e a coleta de dados da temperatura do processo ocorreu a cada 1 segundo. Após o torneamento em cada ensaio, a coleta de dados continuou até que as juntas quentes retornassem a uma temperatura de aproximadamente 35°C. A Figura 16 apresenta o padrão de leitura obtido nos ensaios para um dos termopares.

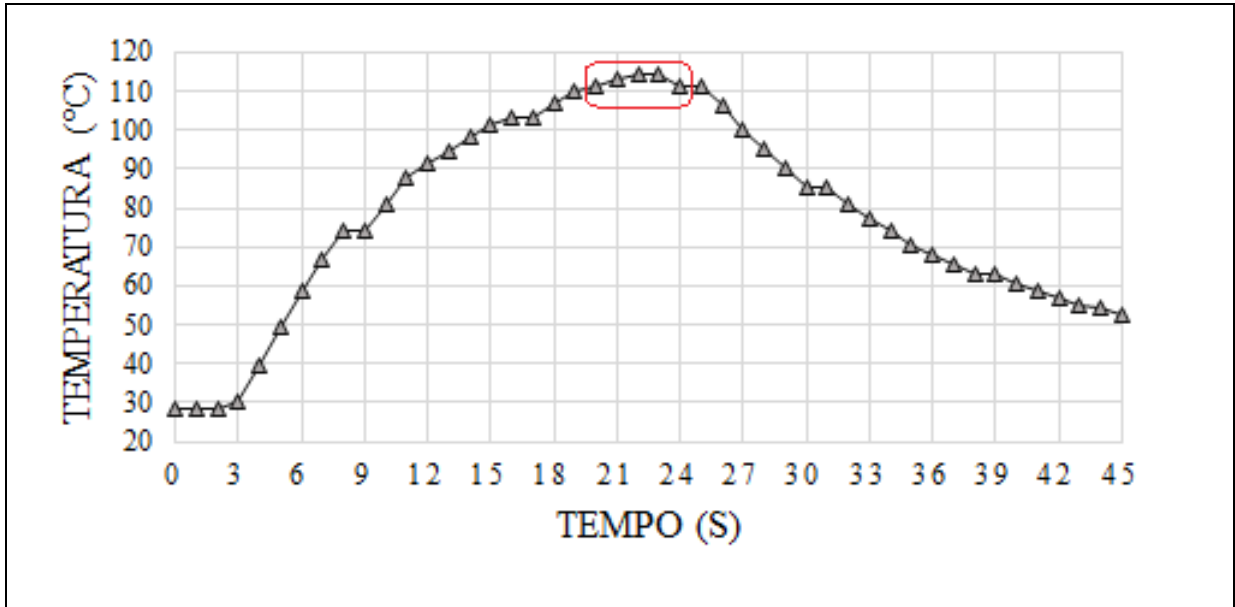


Figura 16 – Gráfico de temperatura por tempo.

Fonte: Pesquisa direta (2024).

A Figura 16 apresenta os dados obtidos da 1ª junta quente sob as condições de operação da situação cinco. Observa-se que o gráfico mostra uma elevação até o vigésimo segundo que corresponde ao início do torneamento. Entre os segundos 20 e 24, o gráfico se estabiliza, refletindo o estado constante do processo de usinagem. Após o segundo 24, o processo de torneamento é interrompido, e a temperatura começa a decrescer até atingir a temperatura ambiente.

Como o objetivo deste trabalho é compreender a influência dos parâmetros de corte na temperatura durante o torneamento, apenas os dados selecionados da Figura 16, que correspondem ao intervalo em que há uma constância na remoção de cavaco, serão analisados.

Como padronização, os dados de interesse serão uma sequência de cinco medições de temperatura no instante de estabilidade da curva ao longo do tempo. Na Figura 16, os dados de temperatura que serão objeto de estudo estão destacados em vermelho. No entanto, por se tratar de um processo em que há grande contaminação dos dados por ruídos, os outliers não serão considerados, conforme ilustrado na Figura 17.

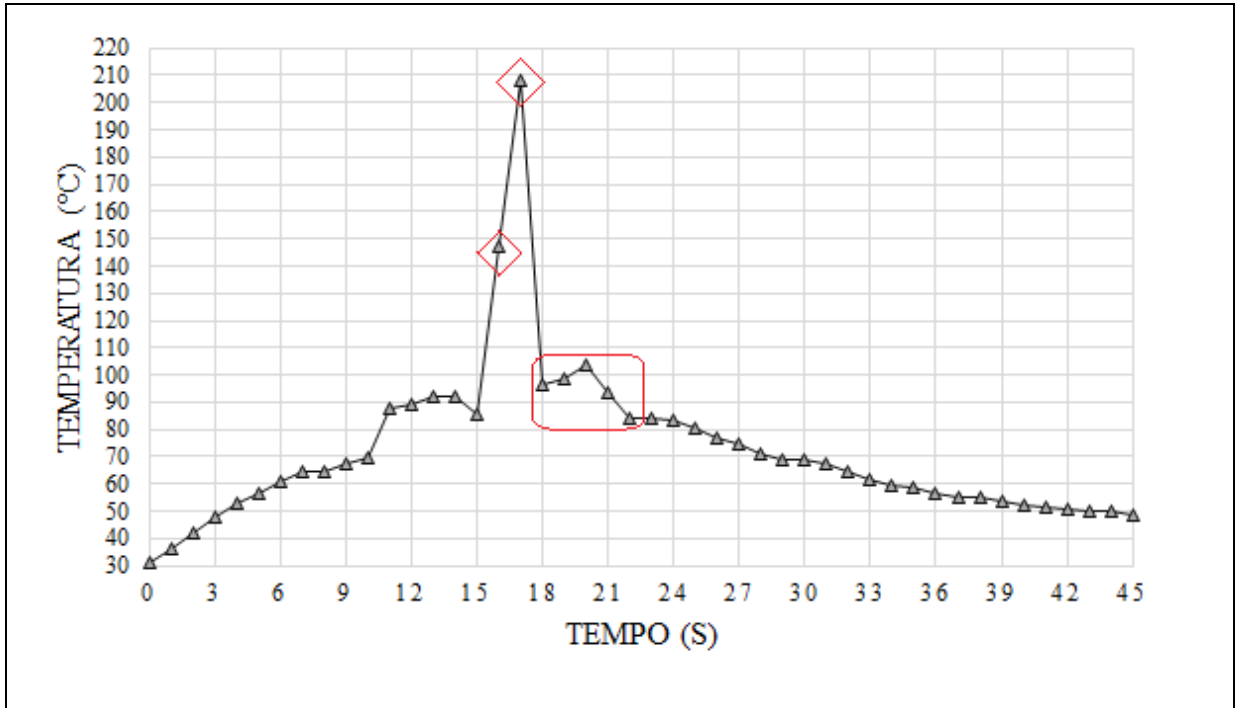


Figura 17 - Pontos de outlier.
Fonte: Pesquisa direta (2024).

A Figura 17 apresenta os dados obtidos da segunda junta quente nas condições estabelecidas para a situação 5. A sequência de pontos de interesse está destacada dentro do retângulo vermelho, enquanto os pontos atípicos estão dentro do losango vermelho, os mesmos serão descartados por não corresponderem à tendência. Isso ocorreu devido à influência da vizinhança no instante da medição. Nesse caso específico, o cavaco não quebrou corretamente, formando um cavaco contínuo que encostou em uma das juntas quentes. Esse desvio fica evidente no gráfico, pois há apenas dois pontos em que os valores de temperatura foram muito diferentes da tendência.

Nos ensaios em que não houve interferência direta da vizinhança, os valores apresentaram uma boa convergência, como ilustrado na Figura 18.

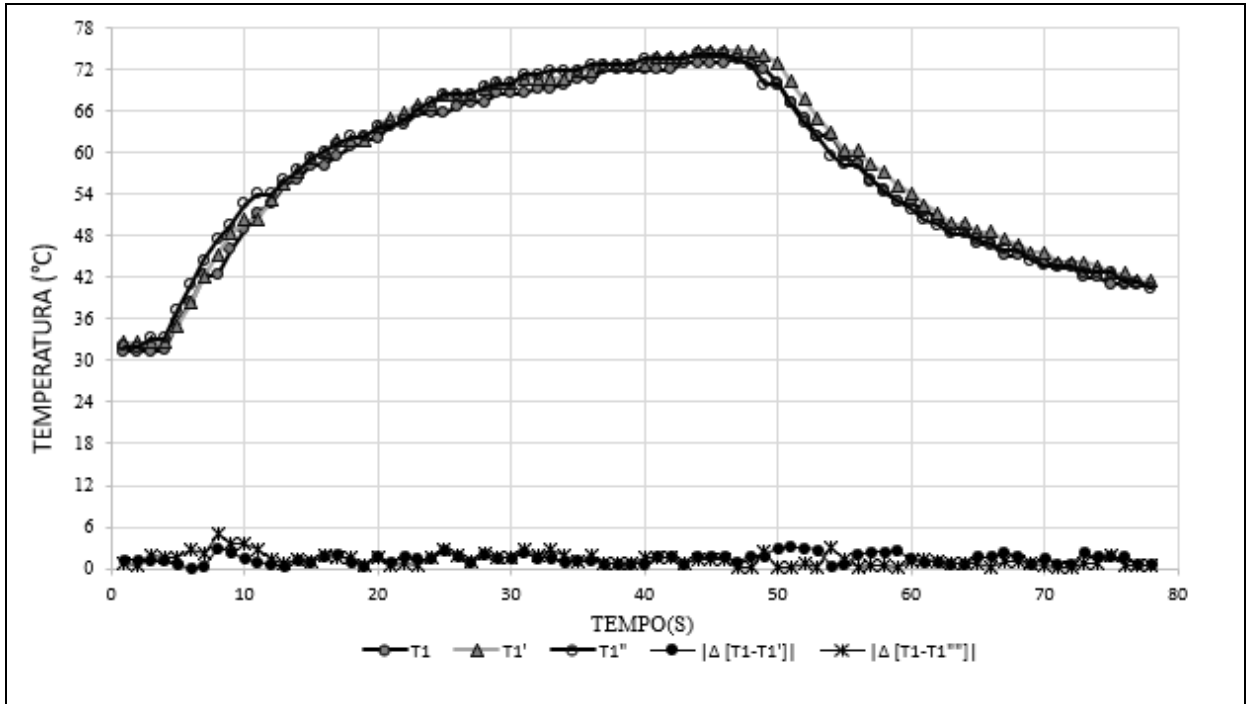


Figura 18 - Temperatura x tempo.
Fonte: Pesquisa direta (2024).

A figura 18 apresenta o gráfico de temperatura ao longo do tempo para a primeira junta quente, com os parâmetros de usinagem da situação três. Em todas as repetições, T1, T1' e T1'', os valores de temperatura mantiveram o comportamento, tanto que os valores de temperatura em cada segundo praticamente se sobrepõem, caracterizando uma baixa ou nenhuma interferência da vizinhança, ou seja, sem presença de outliers.

Os valores analisados correspondem a média dos valores extraídos no intervalo de estabilidade da curva de temperatura por tempo, sendo uma sequência de cinco dados de temperatura para cada uma das três repetições de cada situação. As tabelas 3,4,5,6 e 7 demonstram os valores adquiridos durante os ensaios, bem como a média e o desvio padrão das amostras.

Tabela 3 - Valores de temperatura para situação 1.

SITUAÇÃO 1					
TERMOPAR 1			TERMOPAR 2		
T1(°C)	T1'(°C)	T1''(°C)	T2(°C)	T2'(°C)	T2''(°C)
74.7	80.8	90.2	67.4	67.7	78.0
77.0	81.9	90.2	70.7	73.2	79.9
77.9	80.2	87.0	69.4	73.2	82.1
77.9	76.9	82.8	66.2	69.3	80.7
75.8	72.1	79.4	66.2	66.1	77.4
Média T1		80.3 (°C)	Média T2		72.5 (°C)
Desvio padrão		5.4	Desvio padrão		5.7

Fonte: Pesquisa direta (2024).

A Tabela 3 apresenta os cinco valores de temperatura em cada repetição nos instantes de estabilidade do gráfico de temperatura ao longo do tempo para a primeira e a segunda junta quente. O primeiro termopar apresentou um valor médio de 80,3 °C com desvio padrão de 5,4. O segundo termopar apresentou uma média de 72,5 °C e desvio padrão de 5,7. A Tabela 4 mostra os valores com os parâmetros de usinagem da situação 2.

Tabela 4 - Valores de temperatura para situação 2.

SITUAÇÃO 2					
TERMOPAR 1			TERMOPAR 2		
T1(°C)	T1'(°C)	T1''(°C)	T2(°C)	T2'(°C)	T2''(°C)
77.8	79.0	73.0	63.8	67.3	60.8
78.8	79.0	73.0	65.2	67.9	60.8
79.9	81.0	73.0	65.2	67.9	60.8
78.4	81.0	73.0	65.2	67.9	61.0
76.7	79.4	73.7	63.1	66.5	61.1
Média		77.1(°C)	Média		64.3(°C)
Desvio padrão		3.1	Desvio padrão		2.9

Fonte: Pesquisa direta (2024).

A Tabela 4 destaca uma média de 77,1°C com desvio padrão de 3,1 para a primeira junta quente e 64,3°C com desvio padrão de 2,9 para a segunda junta quente. Os valores de temperatura obtidos na segunda situação apresentaram uma maior correlação dos dados, evidenciada pelo desvio padrão sendo 57% e 51%, respectivamente, menores do que na situação anterior. A tabela 5 apresenta os dados dos ensaios da terceira situação.

Tabela 5 - Valores de temperatura para situação 3.

SITUAÇÃO 3					
TERMOPAR 1			TERMOPAR 2		
T1(°C)	T1'(°C)	T1''(°C)	T2(°C)	T2'(°C)	T2''(°C)
73	74.7	73.6	60.8	62.3	58.4
73	74.7	73.6	60.8	62.3	58.6
73	74.7	74.3	60.8	62.3	58.9
73	74.7	74.3	61	62.3	58.9
73.7	74.7	74.3	61.1	62.2	59.1
Média		74.0(°C)	Média		60.7(°C)
Desvio padrão		0.7	Desvio padrão		1.5

Fonte: Pesquisa direta (2024).

Os valores de temperatura da terceira situação foram os que mais se correlacionaram, como evidenciado pelos desvios padrão de 0,7 e 1,5 para os termopares 1 e 2, respectivamente. As médias de temperatura foram 74°C e 60,7°C. Já a tabela 6 apresenta os

dados de temperatura do torneamento da condição 4, aos quais os valores de temperaturas obtidos também apresentaram uma boa correlação.

Tabela 6 - Valores de temperatura para situação 4.

SITUAÇÃO 4					
TERMOPAR 1			TERMOPAR 2		
T1(°C)	T1'(°C)	T1''(°C)	T2(°C)	T2'(°C)	T2''(°C)
75.1	78	78.7	57.1	61.4	62.4
77	79.3	78.7	59.4	63	64
77	79.9	81	60.6	63	64.6
77	79.9	81	59.6	63	64
77	79.9	81	59.6	61.2	64
Média		78.7(°C)	Média		61.8(°C)
Desvio padrão		1.8	Desvio padrão		2.2

Fonte: Pesquisa direta (2024).

A Tabela 6 destaca a baixa variação entre os valores de temperatura, apresentando uma média de 78,9°C com desvio padrão de 1,8 para o primeiro termopar, e uma média de 61,8°C com desvio padrão de 2,2 para o segundo. Para a tabela 7, que apresenta os valores da usinagem da situação 5. Houve o maior registro de temperatura, mas também a maior variação entre os dados.

Tabela 7 - Valores de temperatura para situação 5.

SITUAÇÃO 5					
TERMOPAR 1			TERMOPAR 2		
T1(°C)	T1'(°C)	T1''(°C)	T2(°C)	T2'(°C)	T2''(°C)
115.1	117.6	111.4	96.2	101.8	95.8
107.3	119.6	113.2	98.5	109	97.3
106	118.6	114.2	103.5	109	102.7
103.4	118.6	114.2	93.3	105.9	101.7
98.9	118.6	111.4	83.9	101.7	98.7
Média		112.5(°C)	Média		99.9(°C)
Desvio padrão		6.2	Desvio padrão		6.4

Fonte: Pesquisa direta (2024)

Os valores extraídos do experimento da situação 5, apresentados na Tabela 7, mostram uma média de temperatura de 112,5°C com desvio padrão de 6,2 para a primeira junta quente, e 99,9°C com desvio padrão de 6,4 para a segunda junta quente.

4.2 Velocidade de corte

Para comparar a influência da velocidade na temperatura de usinagem, foram variados os valores de velocidade de corte, mantendo-se constantes os parâmetros de profundidade e

avanço. A Tabela 8 apresenta as condições adotadas nas situações 1 e 2 no estudo da velocidade de corte.

Tabela 8 - Parâmetros de corte adotados para comparar velocidade.

COMPARATIVO DE VELOCIDADE		
Variáveis	Situação 1	Situação 2
Velocidade (m/min)	200	100
Avanço (mm/volta)	0,2	0,2
Profundidade(mm)	0,5	0,5

Fonte: Pesquisa direta (2024).

Diante das médias e dos desvios padrão de cada situação, foi elaborado o gráfico da Figura 19 para deduzir a influência do aumento da velocidade de corte na temperatura do processo de usinagem.

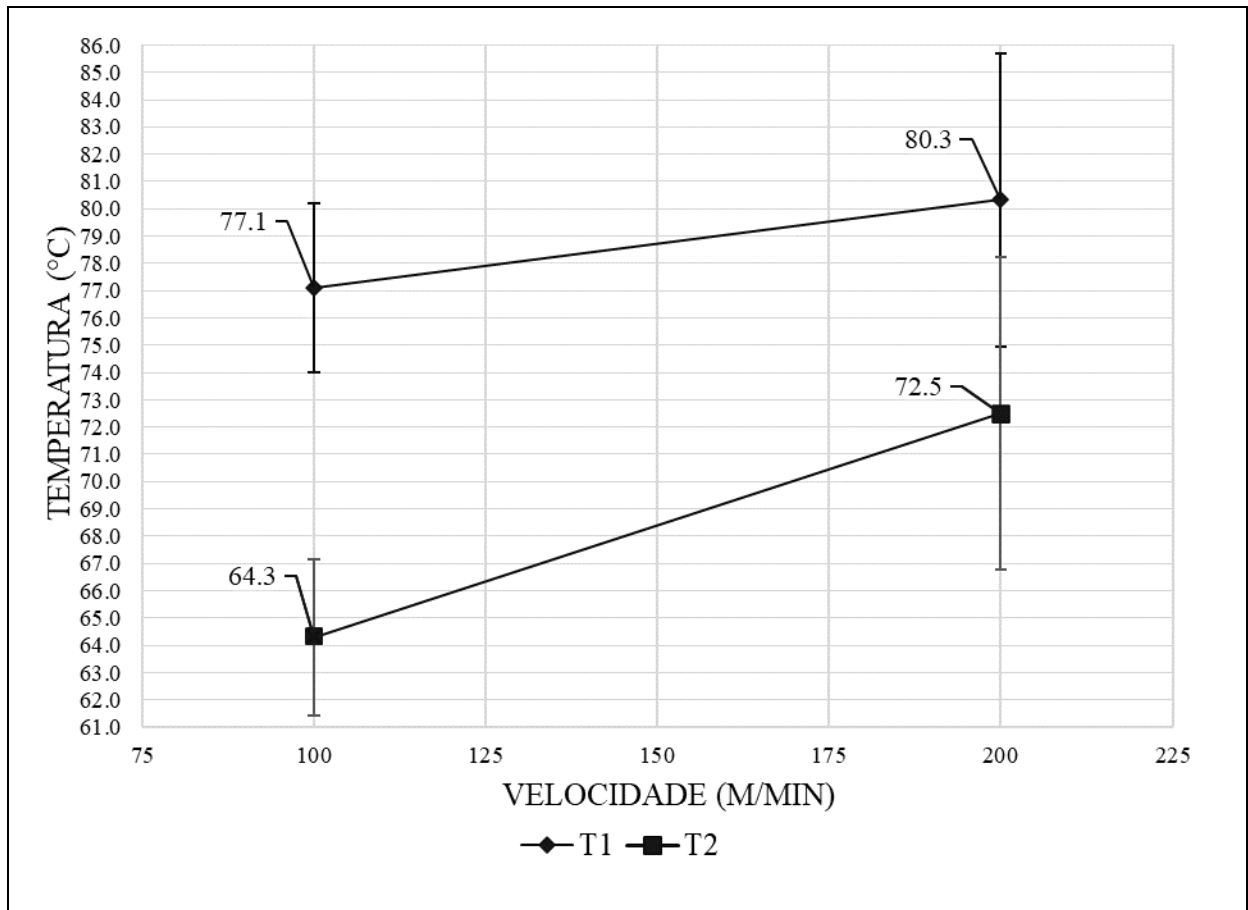


Figura 19 - Comparativo de velocidade
Fonte: Pesquisa direta (2024)

Pela análise dos resultados obtidos, observamos a influência direta da velocidade de corte sobre a temperatura gerada durante o processo de usinagem. Conforme ilustrado na figura 19, observa-se um aumento consistente da temperatura com o incremento da velocidade de corte, tanto nos cenários do termopar T1 quanto no termopar T2.

Na condição da primeira junta quente, a uma velocidade de corte de 100 m/min, a temperatura média registrada foi de 64,3 °C. Entretanto, ao elevar a velocidade de corte para 200 m/min, a temperatura média aumentou para 72,5 °C. Esse comportamento também foi observado na condição T2, onde a temperatura passou de 77,1 °C a 100 m/min para 80,3 °C a 200 m/min. Estes dados demonstram uma tendência de forma direta e proporcional do aumento da temperatura com o acréscimo da velocidade de corte.

Essa tendência do aumento da temperatura com o incremento da velocidade de corte pode ser explicada pelo aumento do atrito entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho. Além disso, à medida que a velocidade de corte aumenta, a taxa de deformação plástica do material da peça também cresce, resultando em uma maior geração de calor. Essa maior deformação plástica gera calor devido à energia mecânica dissipada durante o processo de corte, a qual é convertida em calor. Quanto maior a velocidade de corte, mais energia é transmitida para a zona de corte em um período mais curto de tempo, intensificando o efeito térmico.

Além disso, em velocidades de corte mais elevadas, o tempo disponível para dissipação do calor é reduzido, o que contribui para a concentração de calor na zona de corte. Isso ocorre porque, com o aumento da velocidade, há uma menor janela de tempo para que o calor seja transferido para as áreas adjacentes ou para o fluido de corte, caso seja utilizado. Como resultado, a temperatura na interface entre a ferramenta e a peça de trabalho tende a aumentar, agravando o impacto térmico na região.

4.3 Avanço

Na análise da influência do avanço na temperatura durante o torneamento do aço SAE 1050, foram utilizados valores de avanço de 0,1, 0,2 e 0,3 mm/volta, mantendo-se constantes os parâmetros de velocidade e profundidade, conforme apresentado na Tabela 9. Nesta análise, foram comparados os resultados de temperatura média e desvio padrão das situações 2, 3 e 4.

Tabela 9 - Parâmetros de corte adotados para comparar avanço.

COMPARATIVO DE AVANÇO			
Variáveis	Situação 3	Situação 2	Situação 4
Avanço (mm/volta)	0,1	0,2	0,3
Velocidade (m/min)	100	100	100
Profundidade(mm)	0,5	0,5	0,5

Fonte: Pesquisa direta (2024).

Com base nos dados de médias e desvios padrão de cada situação, foi elaborado o gráfico da Figura 20 para ilustrar a contribuição do avanço na geração de calor durante o processo de torneamento.

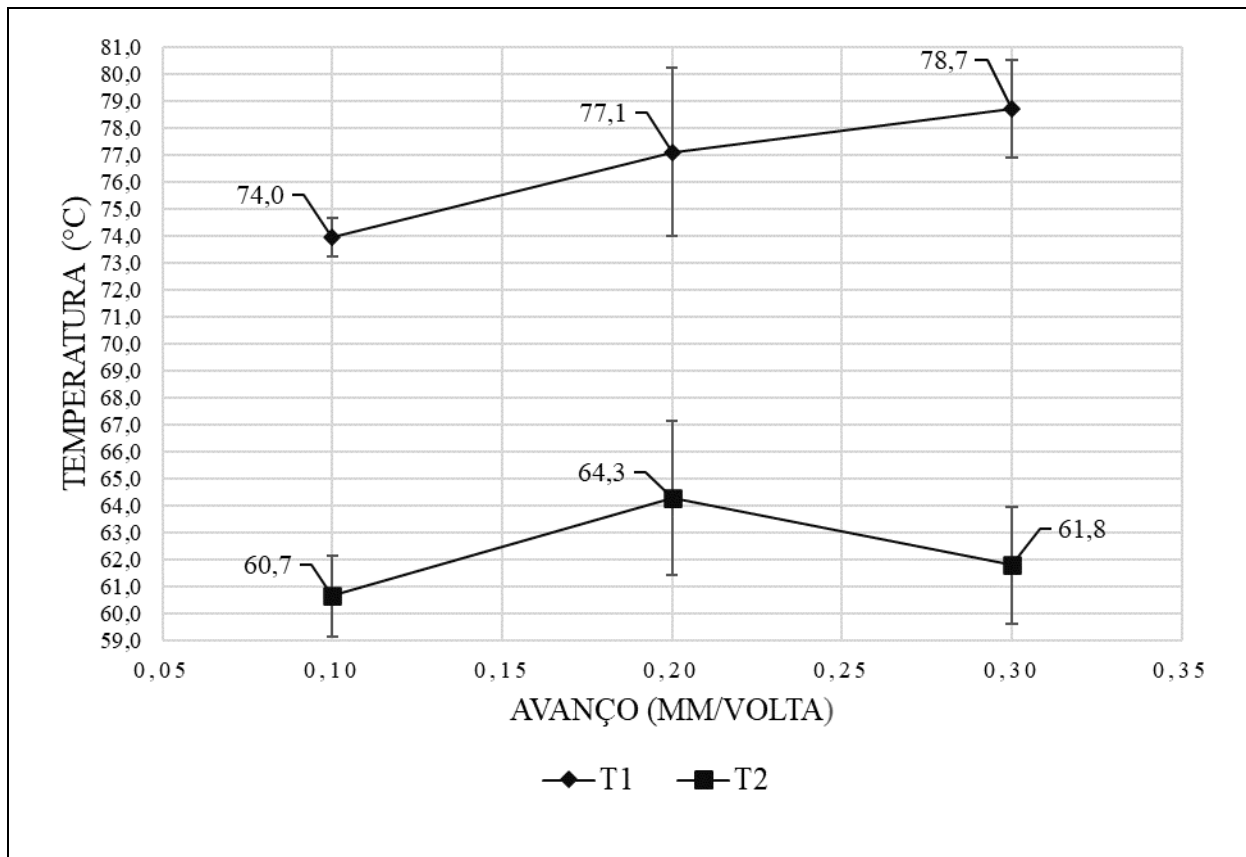


Figura 20 -Comparativo de avanço
Fonte: Pesquisa direta (2024)

Os resultados apresentados no gráfico da figura 20 demonstram que o aumento do avanço durante o processo de usinagem tende a impactar diretamente na temperatura gerada na zona de corte. Observa-se que, em ambas as condições analisadas, termopar 1 e 2, há uma tendência de elevação da temperatura com o aumento do avanço, embora o comportamento específico varie entre as duas condições.

No cenário da primeira junta quente, T1, à medida que o avanço aumenta de 0,10 mm/volta para 0,30 mm/volta, a temperatura também aumenta, passando de 74,0 °C para 78,7 °C. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que, com um avanço maior, a ferramenta de corte remove um maior volume de material a cada volta. Com o aumento do avanço, a força de corte necessária também aumenta, resultando em um maior esforço aplicado pela ferramenta para deformar e cortar o material. Esse esforço adicional intensifica a deformação plástica na zona de corte e eleva o atrito entre a ferramenta e a peça de trabalho, ambos fatores que contribuem para uma maior geração de calor.

O aumento na quantidade de material sendo removido em cada passagem da ferramenta intensifica a geração de calor, elevando, assim, a temperatura do processo. Além disso, com um maior avanço, a área de contato entre a ferramenta e o material também aumenta, o que pode resultar em uma maior acumulação de calor na zona de corte. Isso ocorre porque, a maior área de corte requer mais energia para ser processada, e essa energia é, em grande parte, convertida em calor.

No entanto, na condição T2, o comportamento da temperatura em relação ao avanço é mais complexo. A temperatura inicial de 60,7 °C a 0,10 mm/volta sobe para 64,3 °C a 0,20 mm/volta, mas depois apresenta uma leve queda para 61,8 °C a 0,30 mm/volta. Essa variação pode ser influenciada por uma série de fatores como a eficiência na dissipação de calor, a interação entre a ferramenta e o material, ou mesmo as características específicas do material usinado e da ferramenta utilizada. O aumento do avanço pode criar condições em que a remoção de material adicional facilita a dissipação do calor, ou pode ocorrer uma adaptação da ferramenta e do material à nova condição de corte, reduzindo assim o aumento da temperatura esperado.

4.4 Profundidade

Na avaliação da interferência da profundidade na geração de calor durante o processo de usinagem, foram utilizados valores de profundidade variando de 0,5 mm a 1 mm, mantendo constantes os valores de avanço e de velocidade, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros de corte adotados para comparar profundidade.

COMPARATIVO DE PROFUNDIDADE		
Variáveis	Situação 2	Situação 5
Profundidade(mm)	0,5	1
Avanço (mm/volta)	0,2	0,2
Velocidade (m/min)	100	100

Fonte: Pesquisa direta (2024).

Com os valores médios de temperatura e os desvios padrão das duas juntas quentes, foi elaborado o gráfico da Figura 21 para analisar a contribuição da profundidade na temperatura durante o processo de remoção de cavaco.

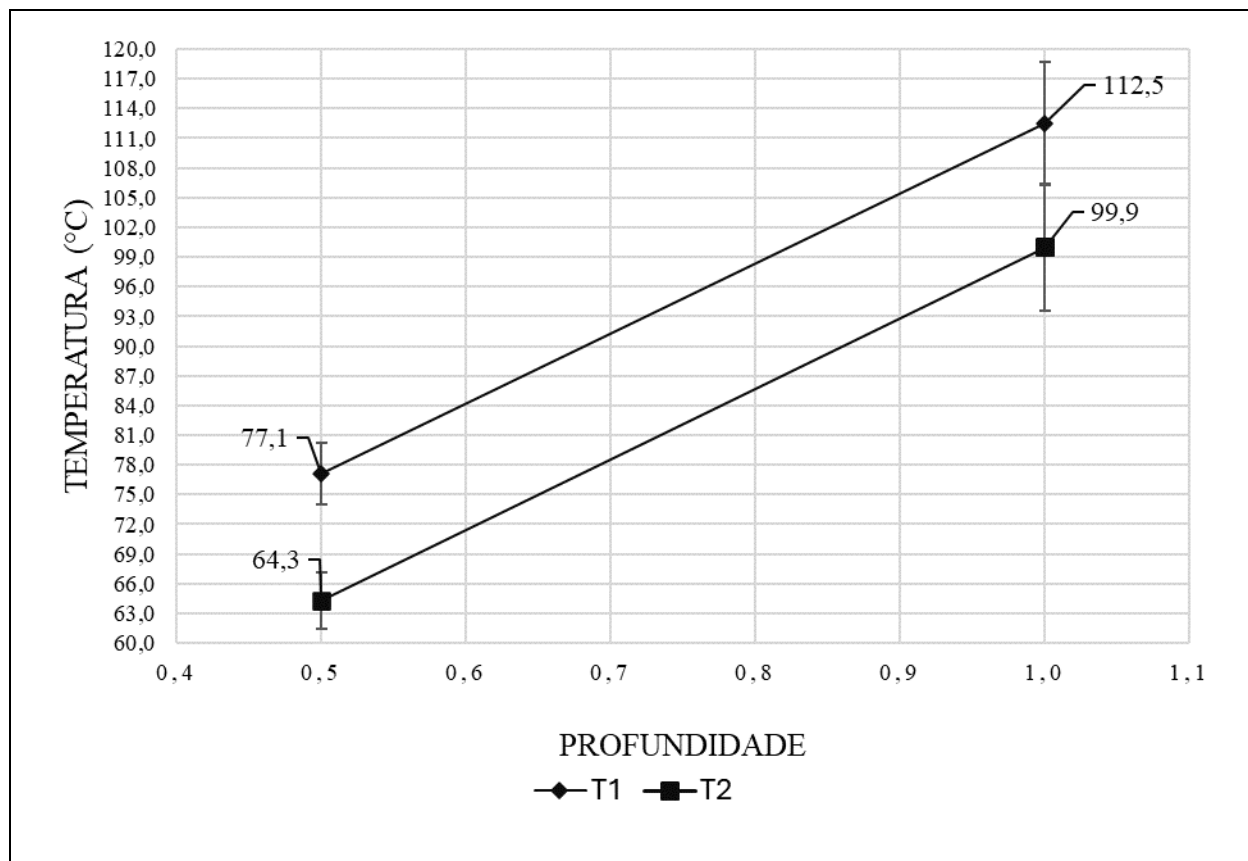


Figura 21 - Comparativo de profundidade.

Fonte: Pesquisa direta (2024).

Os resultados apresentados no gráfico da figura 21, demonstram uma tendência da influência da profundidade de corte na temperatura gerada durante o processo de usinagem. A análise dos dados revela que o aumento da profundidade de corte leva a um acréscimo significativo na média absoluta da temperatura da zona de corte, conforme observado tanto nas condições T1 quanto T2.

Para a condição do termopar T1, a temperatura aumentou de 77,1 °C a 0,5 mm de profundidade para 112,5 °C a 1,0 mm de profundidade. De forma semelhante, na condição T2, a temperatura subiu de 64,3 °C para 99,9 °C ao se aumentar a profundidade de corte de 0,5 mm para 1,0 mm.

O principal motivo para esse aumento de temperatura é o maior volume de material sendo removido quando a profundidade de corte é aumentada. Com uma profundidade maior, a ferramenta de corte entra em contato com uma área maior da peça de trabalho, o que resulta em um aumento da força de corte necessária para remover o material. O aumento na força de corte gera um aumento significativo no atrito entre a ferramenta e o material, resultando em uma maior dissipação de energia na forma de calor na interface de corte.

Além disso, uma maior profundidade de corte também intensifica a deformação plástica do material da peça, o que contribui ainda mais para a geração de calor. À medida que a profundidade de corte aumenta, o volume de material que precisa ser deformado e removido se torna maior, exigindo mais energia e, conseqüentemente, gerando mais calor na zona de corte. Esse aumento da deformação plástica provoca um incremento na energia necessária para o corte, que é dissipada em forma de calor.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas, mediante aos resultados adquiridos experimentalmente, por meio da análise bibliográfica, teórica e análise dos dados.

5.1 Conclusões

A análise dos resultados evidenciou uma alteração na tendência da curva de temperatura exclusivamente na segunda junta quente (T2) durante a avaliação da influência do avanço, o que pode estar relacionado à interferência de fatores externos no experimento. Essa variação sugere a presença de condições externas influenciando os resultados, uma vez que a primeira junta quente (T1), submetida às mesmas condições que T2, demonstrou um aumento na geração de calor conforme o avanço foi intensificado.

Na análise da influência da velocidade, ao dobrar a velocidade de corte de 100 para 200 m/min houve um aumento de 4,15% na geração de calor para T1 e 12,75% em T2.

Com o aumento do avanço de 0,1 para 0,2 mm/volta, a temperatura subiu 4,19% em T1 e 7,17% em T2. Ao passar de 0,2 para 0,3 mm/volta, houve um acréscimo adicional de 2,07% em T1.

Quanto à profundidade de corte, os aumentos de temperatura foram mais significativos. Ao dobrar a profundidade de 0,5 mm para 1 mm, observou-se um aumento de 45,91% em T1 e de 55,36% em T2.

Portanto, com base no estudo realizado, ao considerar as incertezas e influências da vizinhança, conclui-se que o aumento dos parâmetros de corte promove a maior remoção de cavaco e, conseqüentemente, o aumento da deformação plástica e da geração de calor. Esse aumento da remoção de material apresenta um ganho de produtividade ao custo do aumento da temperatura que pode vir a influenciar no desgaste da ferramenta.

Esses resultados confirmam a influência da profundidade de corte, da velocidade de corte e do avanço na temperatura durante a usinagem, como apresentado por Trent e Wright (2000) e Machado et al. (2009), além de convergir com os experimentos realizados por Lima (2017) e Pereira (2022).

5.2 Recomendações

Ademais, recomenda-se a realização de outros estudos, baseados em metodologias e experimentos distintos para determinação do impacto da geração de calor no processo produtivo de torneamento. A partir da análise teórica, incentiva-se o estudo experimental da influência da temperatura no desgaste da ferramenta e na qualidade de peça torneada, sendo considerado tanto a geometria quanto a rugosidade. Sendo assim, diante dos novos estudos e, utilizando-se as mesmas configurações propostas neste trabalho, será possível verificar até que ponto é viável o aumento dos parâmetros de corte para ganhos de produtividade, sem que isso resulte em aumento dos custos de produção ou perda da qualidade no acabamento da peça torneada.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

KAMINISE, A. K. **Estudo Da Influência Do Material Do Porta-Ferramenta Sobre Temperaturas De Usinagem No Torneamento**. 2012.122 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia,2012.

LIMA JUNIOR, E. D. **Medição da Temperatura de Corte no Torneamento do Aço-Ferramenta AISI D6 Temperado e Revenido** Auxiliado por LN2, 2020.136 f. Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal,2020.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos Materiais**, 2ª ed. revisada, São Paulo, Ed. Edgard Blucher, 2011.

NASCIMENTO, C. H. **Estudo Da Distribuição De Temperatura Na Região De Formação De Cavacos Usando Método Dos Elementos Finitos**. 2011. 123 f. Dissertação de Mestrado Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.2011.

PRADEEPKUMAR, M.; AMARNATH, K.; SUNILKUMAR, M. **A Review on Heat Generation in Metal Cutting**. *International Journal of Engineering and Management Research*, v. 4, n. 4, p.193–197, 2015.

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

VILARINHO, L.O.; MACHADO, A.R; **Comportamento Da Temperatura De Corte Durante A Usinagem De Ferro Fundido Cinzento Determinada Pelo Método Termopar Ferramenta-Peça**.*Science and Engineering Journal*, v. 9, n. 2, p. 65-69, 2000.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. 1. Ed., Artliber,2007, 248 p.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, São Paulo, Ed. Edgard Blucher Ltda,1977.

TAYLOR, F. T. **On the art of cutting metals**. *The American Society of Mechanical Engineers*. p.1856-1915, 1907.

KOMANDURI, R; HOU, Z. B. A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology, Tribology International, v.34, p.653-682, 2001.

SUTTER, G. et al. An experimental technique for the measurement of temperature fields for the orthogonal cutting in high speed machining. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v.43, p.671-678, 2003.

BENABID, F. et al. A thermal modeling to predict and control the cutting temperature. The simulation of face-milling process. Procedia Engineering. v.74, p37-42. 2014.

KUS, A. et al. Thermocouple and infrared sensor-based measurement of temperature distribution in metal cutting. Sensors, v. 15, n. 1, p. 1274-1291, 2015.

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.Dissertação de Doutorado da Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

PEREIRA, F. L. Desenvolvimento de um dispositivo para a medição da temperatura na ferramenta durante o processo de torneamento utilizando o método termopar-ferramenta/peça.2022. Dissertação de Tecnólogo em Fabricação do Instituto Federal de Santa Catarina, 2022.

ANEXO