

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

PROPEM

Dissertação

**Efeito do ângulo de saída na
temperatura obtida pelo
método termopar-ferramenta-
peça no torneamento da liga
Ti-6Al-4V**

DIEGO BARBOSA DE FREITAS

Ouro Preto
2023



UFOP



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**EFEITO DO ÂNGULO DE SAÍDA NA TEMPERATURA OBTIDA PELO MÉTODO
TERMOPAR-FERRAMENTA-PEÇA NO TORNEMANTO DA LIGA TI-6AL-4V**

DIEGO BARBOSA DE FREITAS

Ouro Preto, MG

2023

DIEGO BARBOSA DE FREITAS

**EFEITO DO ÂNGULO DE SAÍDA NA TEMPERATURA OBTIDA PELO MÉTODO
TERMOPAR-FERRAMENTA-PEÇA NO TORNEMANTO DA LIGA TI-6AL-4V**

Exame de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Marcio Bacci da Silva, D.Sc.

Ouro Preto, MG

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F866e Freitas, Diego Barbosa de.

Efeito do ângulo de saída na temperatura obtida pelo método termopar-ferramenta-peça no torneamento da liga Ti-6Al-4V. [manuscrito] / Diego Barbosa de Freitas. - 2023.

91 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Marcio Bacci da Silva.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia Mecânica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Ligas de titânio - Ti-6Al-4V. 2. Controle de temperatura - Termopar. 3. Usinagem - Ângulo de saída. 4. Usinagem - Ângulo de folga. I. Silva, Marcio Bacci da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Diego Barbosa de Freitas

**Efeito do ângulo de saída na temperatura obtida
pelo método termopar-ferramenta-peça no torneamento da liga Ti-6Al-4V**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Aprovada em 21 de agosto de 2023

Membros da banca

Prof. Dr. Marcio Bacci da Silva - Orientador - Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Dr. Igor Cezar Pereira - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva - Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Marcio Bacci da Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 25/10/2023



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Paulinelli Guimaraes, COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**, em 05/12/2023, às 11:36, 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 **0636115** e o código CRC **A898650C**.

*Dedico este trabalho a minha
amada esposa Jaqueline, por me
apoiar desde quando o mestrado
era apenas um sonho.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar, por sua maravilhosa graça que me sustenta todos os dias em tudo, a Ele a glória para sempre!

Agradeço a minha esposa, que é minha companheira até o fim.

Agradeço a minha mãe e minha sogra pelo apoio em um momento tão crucial para a conclusão deste trabalho.

Agradeço ao meu Orientador Prof. Márcio Bacci, da Silva por toda paciência e ajuda na conclusão deste trabalho.

Agradeço aos amigos técnicos do Laboratório de Usinagem Convencional (LUC) Thiago Pereira, Thiago Menezes e Alcione dos Reis por toda ajuda nos experimentos.

Agradeço a todos meus professores do programa de pós-graduação da UFOP por todo aprendizado que adquiri com eles.

Agradeço a NIPOTEC pelas ferramentas doadas que foram de extrema importância para conclusão deste trabalho.

“Você tem poder sobre sua mente – não sobre eventos externos. Perceba isso e você encontrará a sua força” (Marco Aurélio).

RESUMO

O titânio e suas ligas são amplamente reconhecidos pelas suas excelentes propriedades físicas, incluindo uma elevada resistência mecânica em relação à sua baixa densidade, além de manter essa resistência mesmo em altas temperaturas, e sua notável resistência à corrosão. No entanto, a usinagem desses materiais é desafiadora devido a suas características de difícil usinabilidade. Por esse motivo, o estudo da usinabilidade das ligas de titânio, como a liga Ti-6Al-4V, desempenha um papel crucial na compreensão do desgaste da ferramenta, que é acelerado pelas altas temperaturas atingidas na interface cavaco-ferramenta. A geometria da ferramenta de corte é essencial na usinagem, afetando calor, eficiência, qualidade e vida útil das ferramentas, bem como a precisão das peças usinadas. Dois parâmetros críticos na geometria da ferramenta de corte são o ângulo de saída e o ângulo de folga. O ângulo de saída influencia a dissipação de calor e o controle de temperatura na zona de corte, enquanto o ângulo de folga é essencial para reduzir o atrito entre a ferramenta e o material usinado, evitando o superaquecimento da ferramenta de corte e melhorando a qualidade da usinagem. Esse trabalho tem como objetivo principal medir a temperatura da interface cavaco-ferramenta durante o processo de torneamento da liga de titânio Ti-6Al-4V, utilizando o método termopar ferramenta-peça. Além disso, investigar o impacto da velocidade de corte, bem como os efeitos dos ângulos de saída e de folga da ferramenta de corte na usinagem da liga. Os resultados obtidos revelam que, de maneira geral, o aumento da velocidade de corte resulta em um aumento correspondente da temperatura gerada na interface cavaco-ferramenta. Além disso, o estudo demonstrou que o aumento do ângulo de saída da ferramenta de corte está associado a uma redução da temperatura de usinagem. Por outro lado, a análise do efeito do ângulo de folga identificou algum impacto do ângulo de folga na temperatura da interface cavaco-ferramenta. Finalmente, uma combinação ideal de ângulo de folga e ângulo de saída foi encontrada para minimizar a geração de calor na interface cavaco-ferramenta em todas as faixas de velocidade de corte, destacando-se como a configuração mais eficaz nos testes realizados.

Palavras-chave: Ti-6Al-4V, termopar ferramenta-peça, ângulo de saída, ângulo de folga.

ABSTRACT

Titanium and its alloys are widely recognized for their excellent physical properties, including high mechanical strength relative to their low density, the ability to maintain this strength even at high temperatures, and remarkable corrosion resistance. However, machining these materials is challenging due to their difficult machinability characteristics. For this reason, the study of the machinability of titanium alloys, such as Ti-6Al-4V, plays a crucial role in understanding tool wear, which is accelerated by the high temperatures reached at the chip-tool interface. The geometry of the cutting tool is essential in machining, impacting heat generation, efficiency, quality, tool lifespan, and the precision of machined parts. Two critical parameters in cutting tool geometry are the rake angle and clearance angle. The rake angle influences heat dissipation and temperature control in the cutting zone, while the clearance angle is essential for reducing friction between the tool and the workpiece, preventing tool overheating, and improving machining quality. The main objective of this work is to measure the temperature at the chip-tool interface during the turning process of the titanium alloy Ti-6Al-4V, using the thermocouple tool-workpiece method. Furthermore, the study aims to investigate the impact of cutting speed and the effects of rake and clearance angle of the cutting tool on the machining of the alloy. The results obtained generally reveal that an increase in cutting speed leads to a corresponding increase in the generated temperature at the chip-tool interface. Additionally, the study demonstrates that an increase in the rake angle of the cutting tool is associated with a reduction in machining temperature. On the other hand, the analysis of the clearance angle effect identified some impact on the temperature at the chip-tool interface. Finally, an optimal combination of rake and relief angles was found to minimize heat generation at the chip-tool interface across all cutting speed ranges, standing out as the most effective configuration in the conducted tests.

Keywords: Ti-6Al-4V, Tool-work thermocouple, Rake angle, clearance angle.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Regiões onde o calor é percebido durante a formação de cavacos (adaptada de MACHADO et. al, 2015)..... | 25 |
| Figura 2 - Distribuição da temperatura na usinagem do titânio e do aço (adaptada de EZUGWU; WANG, 1997 por MOURA, 2017). | 27 |
| Figura 3 – Exemplo de termopar inserido em um inserto de metal duro (adaptada de ABRÃO, 2004). | 29 |
| Figura 4 - Representações esquemáticas (a) de um circuito termopar genérico e (b) do circuito com a conexão do sistema de medição do potencial elétrico EAB (KAMINISE, 2012) | 30 |
| Figura 5 – Esquema do método do termopar ferramenta/peça utilizado na medição da temperatura de usinagem em torneamento cilíndrico externo. | 31 |
| Figura 6 – Contra ponta rotativa convencional que foi modificada para uso no método do termopar ferramenta-peça (ALVELID, 1970) | 32 |
| Figura 7 – Curva de calibração para o sistema de medição termopar-ferramenta-peça usinando Ti-6Al-4V (adaptado de TABAK, 2015) | 33 |
| Figura 8 – Diagrama esquemático do sistema de medição termopar ferramenta-peça (Marques 2015),..... | 34 |
| Figura 9 – Influência do avanço nas temperaturas das ferramentas usadas para cortar aço com avanços de (a) $f = 0.125$ mm/rev; (b) $f = 0.250$ mm/rev; (c) $f =$ $0,500$ mm/rev (TRENT, 1984)..... | 36 |
| Figura 10 – Montagem experimental para medir a distribuição de temperatura pelo método PVD (Casto et. al., 1994). | 38 |
| Figura 11- a) Representação esquemática do sistema de aquisição de temperatura; b) sistema de aquisição de dados montado no porta-ferramentas (Campidelli et al. 2019). | 39 |
| Figura 12- Testes específicos: temperatura de usinagem utilizando a técnica termopar ferramenta-peça, variando vc de 30 à 70 m/min, f de 0,05 à 0,25 mm/rev e ap de 0,50 mm (Moura 2017). | 45 |

| | |
|--|----|
| Figura 13 - Temperatura de usinagem em função da velocidade de corte (Cunha 2020). | 46 |
| Figura 14 - Desgaste de ferramenta ISO S15 na usinagem de titânio a em três diferentes velocidades de corte: A) 85 m/min; B) 100 m/min; C) 120 m/min (MOREIRA et al., 2004) | 47 |
| Figura 15 - Peça da liga de titânio Ti-6Al-4V utilizada nos ensaios..... | 51 |
| Figura 16 - Microestrutura da liga Ti-6Al-4V (Adaptado de MOURA, 2017)..... | 51 |
| Figura 17 – a) afiadora universal AtlasMq utilizada para afiar as ferramentas. b) rebolo de diamante | 53 |
| Figura 18 – ferramentas de corte utilizadas..... | 54 |
| Figura 19 - Torno eletrônico universal Diplomat® modelo Revolution RV-220 utilizado nos testes. | 55 |
| Figura 20 - Componentes da contra ponta rotativa modificada utilizada (KAMINISE, 2012) | 56 |
| Figura 21 - Desenho esquemático do sistema de medição de temperatura. | 57 |
| Figura 22 - Aparato experimental evidenciando todas as partes devidamente isoladas..... | 58 |
| Figura 23 – Esquema do sistema montado para adquirir a curva de calibração..... | 61 |
| Figura 24 – Curva de calibração do sistema termopar ferramenta-peça. | 63 |
| Figura 25 - Curvas temperatura em função da velocidade corte para todas as ferramentas..... | 65 |
| Figura 26 – Temperatura obtida para as ferramentas A1($\gamma_0 = 0^\circ$) e A2 ($\gamma_0 = 5^\circ$)..... | 68 |
| Figura 27 – Temperatura obtida para as ferramentas B1 ($\gamma_0 = 0^\circ$) e B2 ($\gamma_0 = 5^\circ$). | 69 |
| Figura 28 – Temperaturas obtidas para as ferramentas C1 ($\gamma_0 = 0^\circ$), C2 ($\gamma_0 = 5^\circ$), C3 ($\gamma_0 = 11,5^\circ$) e C4 ($\gamma_0 = 16,5^\circ$). | 70 |
| Figura 29 – Comparando as temperaturas obtidas para as ferramentas: a) C1 ($\gamma_0 = 0^\circ$) e C2 ($\gamma_0 = 5^\circ$), b) C3 ($\gamma_0 = 11,5^\circ$) e C4 ($\gamma_0 = 16,5^\circ$). | 71 |

| | |
|---|----|
| Figura 30 – Temperaturas obtidas para as ferramentas B1 ($\alpha_0 = 2^\circ$), A1 ($\alpha_0 = 4,5^\circ$) e C1 ($\alpha_0 = 7^\circ$). | 77 |
| Figura 31 – Temperaturas obtidas para as ferramentas B2 ($\alpha_0 = 2^\circ$), A2 ($\alpha_0 = 4,5^\circ$) e C2 ($\alpha_0 = 7^\circ$). | 78 |
| Figura 32 – Comparação entre as curvas de calibração. a) curva de calibração obtida por Cunha (Cunha 2020), b) curva de calibração obtida neste trabalho..... | 82 |
| Figura 33 - Comparação da temperatura interface cavaco-ferramenta no trabalho de Cunha (2020) com este Trabalho. | 83 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Temperaturas de fusão do NaCl e outros elementos (MACHADO et. al, 2015). | 37 |
| Tabela 2 – Classificação das ligas de titânio (Knoll and Schaeffer, 2006). | 42 |
| Tabela 3 - Composição química da liga Ti-6Al-4V (MOURA, 2017)..... | 52 |
| Tabela 4 – Geometria das ferramentas utilizadas..... | 53 |
| Tabela 5 – Ângulos de folga e de saída e velocidade de corte utilizados..... | 59 |
| Tabela 6 - Médias das temperaturas obtidas em todos os ensaios..... | 64 |
| Tabela 7 – Diferença de temperatura por faixas de velocidade de corte..... | 66 |
| Tabela 8 - Efeito da velocidade de corte sobre a temperatura de usinagem..... | 67 |
| Tabela 9 - Diferença de temperatura para análise do ângulo de saída das ferramentas A1 e A2. | 68 |
| Tabela 10 - Diferença de temperatura para análise do ângulo de saída das ferramentas B1 e B2..... | 69 |
| Tabela 11 - Diferença de temperatura para análise do ângulo de saída das ferramentas C1, C2, C3 e C4. | 72 |
| Tabela 12 - Efeito do ângulo de saída sobre a temperatura de usinagem para as ferramentas A1 e A2 | 74 |
| Tabela 13 - Efeito do ângulo de saída sobre a temperatura de usinagem para as ferramentas B1 e B2..... | 75 |
| Tabela 14 - Efeito do ângulo de saída sobre a temperatura de usinagem para as ferramentas C1, C2, C3 e C4. | 76 |
| Tabela 15 - Efeito do ângulo de folga sobre a temperatura de usinagem para as ferramentas A1, B1 e C1..... | 79 |
| Tabela 16 - Efeito do ângulo de folga sobre a temperatura de usinagem para as ferramentas A2, B2 e C2..... | 80 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------|---|
| Al | Alumínio |
| A1 | Ferramenta de corte A1 |
| A2 | Ferramenta de corte A2 |
| a_p | Profundidade de corte |
| B1 | Ferramenta de corte B1 |
| B2 | Ferramenta de corte B2 |
| Bi | Bismuto |
| C1 | Ferramenta de corte C1 |
| C2 | Ferramenta de corte C2 |
| C3 | Ferramenta de corte C3 |
| C4 | Ferramenta de corte C4 |
| C | Carbono |
| Co | Cobalto |
| Cr | Cromo |
| Cu | Cobre |
| ddp | Diferença de potencial elétrico |
| f | Avanço |
| Fe | Ferro |
| H | Hidrogênio |
| HC | Estrutura cristalina hexagonal compacta |
| HRC | Dureza Rockwell C |
| In | Índio |
| Nb | Nióbio |
| Mn | Manganês |

| | |
|--------------|--|
| Mo | Molibdênio |
| N | Nitrogênio |
| O | Oxigênio |
| Q_z | Calor gerado na zona de cisalhamento primário |
| Q_{a_1} | Calor gerado na zona de cisalhamento secundário |
| Q_{a_2} | Calor gerado na zona de interface peça/superfície de folga da ferramenta |
| Q_c | Calor dissipado pelo cavaco |
| Q_p | Calor dissipado pela peça |
| Q_{ma} | Calor dissipado pelo meio ambiente |
| Q_f | Calor dissipado pela ferramenta de corte |
| PVD | <i>Physical Vapour Deposition</i> |
| Pb | Chumbo |
| r_ϵ | Raio de ponta |
| Si | Silício |
| Sn | Estanho |
| Ta | Tântalo |
| Ti | Titânio |
| T_u | Temperatura de usinagem obtida nos experimentos |
| V | Vanádio |
| V_c | Velocidade de corte |
| Zr | Zircônio |
| ϵ_r | Ângulo de ponta |
| γ_o | Ângulo da saída |
| α_o | Ângulo de folga |
| α_o' | Ângulo de folga secundário |

| | |
|-------------|----------------------------|
| λ_s | Ângulo de inclinação |
| χ | Ângulo de posição |
| χ_r | Ângulo de posição primário |

SUMÁRIO

| | |
|--|-------------|
| LISTA DE FIGURAS..... | x |
| LISTA DE TABELAS | xiii |
| SUMÁRIO | xvii |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 19 |
| 1.1 Objetivos Geral e Específicos..... | 21 |
| 1.1.1 Geral | 21 |
| 1.1.2 Específicos..... | 21 |
| 1.2 Metodologia..... | 21 |
| 1.3 Justificativa..... | 22 |
| 1.4 Estrutura do Trabalho | 22 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO E FUNDAMENTAÇÃO CIENTÍFICA | 24 |
| 2.1 Temperatura de usinagem..... | 24 |
| 2.2 Métodos de medição da temperatura de usinagem | 28 |
| 2.2.1 Medição por termopares inseridos na ferramenta..... | 29 |
| 2.2.2 Termopar ferramenta/peça..... | 29 |
| 2.2.3 Radiação infravermelha..... | 34 |
| 2.2.4 Vernizes termossensíveis..... | 35 |
| 2.2.5 Propriedades metalográficas..... | 35 |
| 2.2.6 Sais com diferentes temperaturas de fusão..... | 36 |
| 2.2.7 Filmes depositados por PVD | 37 |
| 2.2.8 Ferramentas inteligentes | 38 |
| 2.3 Usinabilidade do Titânio..... | 40 |
| 2.3.1 Usinabilidade do Titânio e suas ligas | 43 |
| 2.3.2 Efeitos da geometria da ferramenta de corte na usinabilidade | 48 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 50 |
| 3.1 | Material da peça..... | 50 |
| 3.2 | Ferramentas de corte..... | 52 |
| 3.3 | Equipamentos..... | 54 |
| 3.4 | Contra pontas modificada | 55 |
| 3.5 | Medição da temperatura de usinagem | 56 |
| 3.6 | Calibração do termopar ferramenta-peça..... | 60 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 62 |
| 4.1 | Obtenção da Curva de Calibração do Sistema Termopar Ferramenta-Peça..... | 62 |
| 4.2 | Medição da temperatura de usinagem | 64 |
| 4.3 | Temperatura variando a velocidade de corte | 64 |
| 4.4 | Temperatura variando ângulo de saída da ferramenta de corte. | 67 |
| 4.5 | Temperatura variando ângulo de folga da ferramenta de corte. | 77 |
| 4.6 | Comparação com os resultados obtidos por Cunha (2020) | 81 |
| 5 | CONCLUSÕES..... | 84 |
| 6 | REFERÊNCIAS..... | 86 |

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Donachie (1988), Shaw (2005) e Pramanik (2014) as ligas de titânio são amplamente utilizadas em diversas aplicações industriais como na área aeroespacial, indústria química e também engenharia médica isso é devido às suas excelentes propriedades mecânicas, boa resistência à corrosão, baixa densidade, elevada resistência a fluência e resistência mecânica elevada com peso relativo menor em comparação aos aços. No entanto, a usinagem dessas ligas pode ser desafiadora devido à sua baixa condutividade térmica, alta reatividade química e elevada tendência de adesão dos cavacos à ferramenta.

Conforme Ezugwu e Wang (1997), durante a usinagem de ligas de titânio, ocorre a geração de altas temperaturas, principalmente próximas à aresta de corte da ferramenta, o que resulta no rápido desgaste da mesma. A baixa condutividade térmica da liga de titânio Ti-6Al-4V faz com que uma grande porcentagem (cerca de 80%) do calor gerado durante a usinagem seja conduzida para a ferramenta. Isso faz com que as temperaturas na ferramenta possam chegar a até 1100°C. Cunha (2020) em sua dissertação, usinando a liga de titânio Ti-6Al-4V com ferramenta de metal duro da classe K10 atingiu temperaturas próximas aos 900 °C.

A compreensão da temperatura gerada durante o processo de usinagem é fundamental para garantir a integridade da peça usinada, a vida útil da ferramenta e a qualidade da superfície. No entanto, conforme ressaltado por Trent e Wright (2000), a determinação da temperatura na interface entre o cavaco e a ferramenta através de experimentos é uma tarefa complexa. Vários fatores complicam a medição precisa da temperatura durante o processo de usinagem. Isso inclui a estreita espessura de cisalhamento, a presença do cavaco que atua como um obstáculo, e o fato de que o cavaco está constantemente em contato e em movimento em relação a outros elementos. Essas circunstâncias tornam desafiador o acesso e a obtenção precisa da temperatura nessa região crítica.

Ao longo do tempo, foram desenvolvidas várias técnicas de medição de temperatura para avaliar o aumento térmico nas zonas de corte durante o processo de usinagem. Um exemplo é o método termopar ferramenta-peça. Onde o termopar pode ser definido como um sistema formado por dois condutores metálicos distintos, sendo puros ou de ligas homogêneas. Esses fios condutores têm uma de suas extremidades soldadas na região denominada por “junta de medição” e as outras são conectadas ao instrumento de medição na região denominada por “junta de referência”, fechando o circuito elétrico (MACHADO *et al.*, 2009).

Apesar da eficiência do método do termopar ferramenta-peça, fechar o circuito elétrico e calibrá-lo, tem sido problemas desafiantes. A calibração do sistema permite a obtenção da temperatura em função da ddp, e para obtê-la, é necessário a utilização de um sistema de aquisição de dados para relacionar a temperatura com a ddp, obtendo a curva de calibração estática (COSTA, 2015).

O método termopar-ferramenta-peça tem sido bastante utilizado para medir a temperatura na interface cavaco-ferramenta-peça durante a operação de torneamento como por exemplo Kaminise (2012), Stephenson (1993), Santos *et al.* (2017). Também pesquisas para o torneamento da liga Ti-6Al-4V Khan *et al.* (2017), Zhang *et al.* (2018), Moura (2017) e Cunha (2020).

Entretanto, diversos fatores podem influenciar a temperatura obtida no método, incluindo parâmetros de corte, geometria da ferramenta e condições de contato na interface de corte.

Conforme destacado por Rodrigues (2005), a geometria da ferramenta de corte exerce um papel crucial no processo de usinagem. Variações mínimas nas dimensões e ângulos podem ocasionar comportamentos distintos do material na aresta de corte da ferramenta. Assim, a geometria da ferramenta se configura como uma variável de extrema importância no processo de usinagem.

O objetivo deste trabalho é investigar o efeito do ângulo de saída e ângulo de folga na temperatura obtida pelo método termopar-ferramenta-peça durante a operação de torneamento da liga Ti-6Al-4V. Foram realizados ensaios com diferentes combinações desses ângulos, considerando parâmetros de corte constantes, como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. As temperaturas foram medidas utilizando o método do termopar ferramenta-peça. Além disso, uma análise abrangente dos resultados experimentais será conduzida para investigar a influência do ângulo de saída e ângulo de folga nas temperaturas obtidas.

Espera-se que os resultados desta pesquisa possam contribuir para uma melhor compreensão do comportamento térmico durante o torneamento da liga Ti-6Al-4V, fornecendo informações relevantes para a escolha apropriada de ângulos de saída e ângulos de folga e otimização dos parâmetros de corte. Essas informações serão valiosas para a indústria manufatureira, especialmente para empresas envolvidas na produção de componentes de

titânio, auxiliando na melhoria da qualidade das peças usinadas, aumento da vida útil da ferramenta e redução de custos operacionais.

Ao longo desta dissertação, serão apresentados os fundamentos teóricos relacionados ao torneamento da liga Ti-6Al-4V, a metodologia experimental adotada, os resultados obtidos e suas análises. As conclusões finais serão apresentadas, destacando as contribuições desta pesquisa e indicando possíveis direções futuras para o aprimoramento do processo de usinagem da liga Ti-6Al-4V em termos de controle térmico.

1.1 Objetivos Geral e Específicos

1.1.1 Geral

O principal objetivo deste trabalho é medir a temperatura da interface cavaco-ferramenta utilizando o método do termopar ferramenta-peça.

1.1.2 Específicos

Será investigado os efeitos dos ângulos de saída e de folga da ferramenta de corte, bem como o efeito velocidade de corte na temperatura da interface cavaco-ferramenta.

1.2 Metodologia

Este trabalho foi conduzido no Laboratório de Usinagem Convencional (LUC), localizado na Universidade Federal de Uberlândia.

A medição da temperatura será realizada utilizando uma contra ponta especial e um sistema de aquisição de sinais Agilent. Todos os equipamentos necessários para a execução dos ensaios experimentais, incluindo o material da peça usinada e outros dispositivos auxiliares, estão disponíveis no LEPU.

A fim de obter a temperatura por meio do sinal termoelétrico, será realizada a calibração do sistema utilizando uma metodologia desenvolvida no próprio laboratório. Para isso, contaremos com o auxílio de um forno Mufla, também disponível no LEPU.

Além desses recursos, serão utilizadas ferramentas de metal duro da classe K10, fornecidas na forma de barras. Essas ferramentas serão afiadas no laboratório, utilizando uma afiadora de ferramentas e rebolo de diamante.

1.3 Justificativa

A liga de titânio Ti6Al4V é um material considerado de difícil usinabilidade, além de ser um material extremamente caro. Um dos motivos de sua difícil usinagem são as altas temperaturas desenvolvidas na interface cavaco ferramenta, o que limita a velocidade de corte que pode ser usada. No entanto, a medição experimental da temperatura da interface ainda é um grande desafio para a área de usinagem. Vários métodos são utilizados para estimar, mas talvez o método mais utilizado seja o conhecido método do termopar ferramenta-peça. Este método, apesar de relativamente simples tem grandes desafios na prática. Um dos desafios é a calibração do sistema. Assim, este método ainda tem sido investigado e melhorado. Conhecer como é a influência de parâmetros de corte e geometria da ferramenta na temperatura, pode ajudar nas melhores práticas de usinagem, visando por exemplo, o aumento da vida da ferramenta. Este trabalho poderá contribuir então para melhoramentos no método do termopar ferramenta-peça e para maior entendimento do efeito de alguns parâmetros na temperatura na usinagem deste material de difícil usinagem.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos, os quais são detalhados a seguir:

1 - Introdução: Neste capítulo, são apresentados a introdução do trabalho, os objetivos propostos e suas respectivas justificativas.

2 - Revisão Bibliográfica: Este capítulo aborda de forma abrangente a literatura pertinente aos temas de usinabilidade do titânio, temperatura de usinagem e o método do termopar ferramenta-peça.

3 - Metodologia: Aqui, é descrita em detalhes a metodologia adotada neste trabalho, incluindo os materiais, ferramentas e instrumentos utilizados durante a pesquisa.

4 - Resultados e Discussões: Neste capítulo, são apresentados todos os resultados obtidos ao longo do trabalho, bem como a análise dos resultados e as discussões pertinentes a eles.

5 - Conclusões: O quinto capítulo trata das conclusões alcançadas com base nos resultados e nas discussões apresentadas anteriormente.

6 - Referências Bibliográficas: Por fim, este capítulo lista todas as referências bibliográficas utilizadas na elaboração deste trabalho, seguindo as normas de citação e referência adequadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO E FUNDAMENTAÇÃO CIENTÍFICA

Nesta seção, será abordado toda a base teórica relevante referente aos tópicos de temperatura de usinagem, o método do termopar ferramenta-peça, usinabilidade do titânio e os impactos da geometria da ferramenta de corte

2.1 Temperatura de usinagem

Na usinagem, boa parte da energia consumida no cisalhamento do material é amplamente convertido em calor. As principais fontes transformadoras de calor no processo de usinagem são: a deformação e o cisalhamento do cavaco nos planos de cisalhamento, o atrito do cavaco com a ferramenta e o atrito da ferramenta com a peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2012).

A energia gasta no processo de formação de cavacos é percebida na forma de calor em três regiões distintas na área de formação de cavacos: na zona do plano de cisalhamento ou zona primária de cisalhamento (região A, na Figura 1), na interface entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta ou zona secundária de cisalhamento (regiões B e C, na Figura 1) e na interface de contato da peça com a superfície de folga da ferramenta ou zona terciária de cisalhamento (região D, na Figura 1). O calor, na zona primária de cisalhamento provem do trabalho de cisalhamento interno do material, enquanto nas outras zonas o calor vem na forma de atrito e do cisalhamento interno provocados pela aderência entre as superfícies (MACHADO *et. al*, 2015).

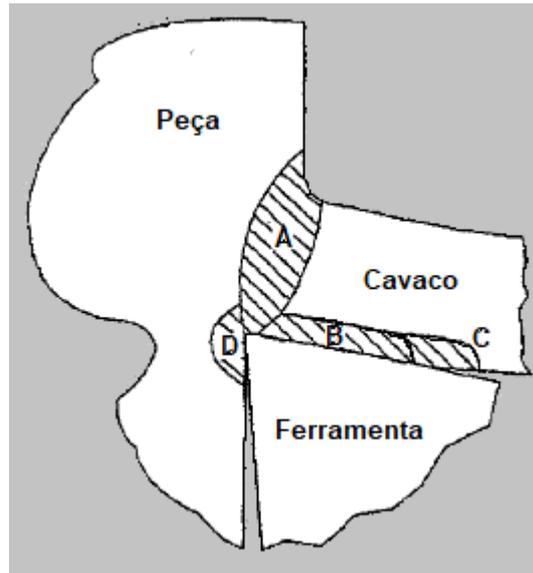


Figura 1 – Regiões onde o calor é percebido durante a formação de cavacos (adaptada de MACHADO *et. al*, 2015)

Grande parte desse “calor gerado” é dissipada pelo cavaco, uma pequena porcentagem é dissipada pela peça e uma outra, para o meio ambiente. O restante vai para a ferramenta de corte. Apesar de esse restante representar apenas pequenos percentuais (8% a 10%), o aumento da temperatura associado com esse calor é significativo, podendo chegar, em certos casos, a 1100 °C, o que compromete fortemente, a resistência da ferramenta (MACHADO *et. al*, 2015).

A equação do balanço energético pode ser escrita conforme a equação (2.1).

$$Qz + Qa_1 + Qa_2 = Qc + Qp + Qma + Qf \quad (2.1)$$

onde,

Qz = calor gerado na zona de cisalhamento primário

Qa_1 = calor gerado na zona de cisalhamento secundário

Qa_2 = calor gerado na zona de interface peça/superfície de folga da ferramenta

Qc = calor dissipado pelo cavaco

Qp = calor dissipado pela peça

Qma = calor dissipado pelo meio ambiente

Qf = calor dissipado pela ferramenta de corte.

De acordo com Ferraresi (2003), conforme mencionado na Equação (2.1), é possível observar que o calor total gerado durante o processo de usinagem é composto pela soma dos calores transformados nas zonas de cisalhamento primária, secundária e terciária. Seguindo o princípio da conservação de energia, esse calor deve ser igual à soma das parcelas de calor dissipado pela ferramenta, cavaco, peça e meio ambiente. Cada uma dessas parcelas resulta da soma do calor transformado em cada uma das regiões e conduzido ao elemento.

Segundo Silva (2007), é importante ressaltar que alguns mecanismos de desgaste durante a usinagem são de origem térmica, enquanto outros têm origem mecânica, sendo que ambos são afetados pela temperatura. Nesse sentido, as altas temperaturas alcançadas na interface entre o cavaco e a ferramenta, assim como na região de contato entre a ferramenta e a peça, representam uma das principais causas do desgaste das ferramentas de corte. Essa condição acaba limitando a aplicação de condições de corte mais elevadas, estabelecendo assim limites para a produtividade e vida útil das ferramentas. Por conseguinte, compreender as temperaturas envolvidas no processo de corte torna-se crucial para obter dados que permitam o redimensionamento das ferramentas, visando a prolongar sua vida útil e gerar economia no processo.

Conforme mencionado por Machado *et al.* (2015), o custo da usinagem está diretamente relacionado à quantidade de material removido, e uma estratégia para reduzi-lo é aumentar a velocidade de corte e/ou a velocidade de avanço. No entanto, é necessário considerar que existem limites para essas velocidades, uma vez que aumentá-las excessivamente pode resultar em uma redução drástica na vida útil da ferramenta, o que, por sua vez, acarreta um aumento nos custos. Esse cenário torna-se particularmente crítico ao lidar com materiais como aços, ferros fundidos e ligas à base de níquel, nos quais podem surgir problemas mais sérios, como o aquecimento excessivo da ferramenta durante o processo de usinagem, levando ao colapso da ferramenta em um período de tempo relativamente curto.

Altas temperaturas de corte são geradas quando as ligas de titânio são usinadas, essas elevadas temperaturas atuam perto da aresta de corte da ferramenta, sendo assim, esta é uma das principais razões para o acelerado desgaste da aresta de corte. Como ilustrados na Figura. 2.2, uma grande porcentagem (cerca de 80%) do calor gerado na usinagem de liga de titânio Ti-6Al-4V, é conduzida para a ferramenta, porque não pode ser removido com o cavaco ou dissipado para a peça de trabalho, devido à baixa condutividade térmica das ligas de titânio, que é aproximadamente 1/6 dos aços. Cerca de 50% do calor gerado é absorvido pela ferramenta

durante a usinagem dos aços, vide Figura 2. A investigação da distribuição da temperatura de corte tem mostrado que os gradientes de temperatura são muito mais acentuados e a zona afetada pelo calor é muito menor e mais perto da aresta de corte durante a usinagem das ligas de titânio, porque os cavacos gerados são mais finos e a presença de uma zona de fluxo muito fina entre o cavaco e a ferramenta (aproximadamente 8 μm , enquanto que para os aços é de 50 μm sob as mesmas condições de corte), que provoca altas temperaturas na ponta da ferramenta, que podem chegar até 1100°C (EZUGWU; WANG, 1997).

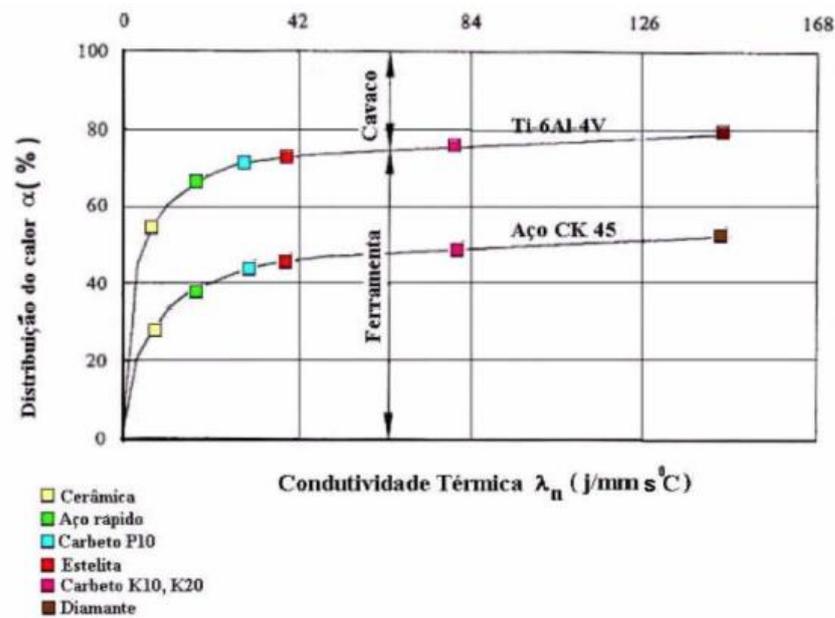


Figura 2 - Distribuição da temperatura na usinagem do titânio e do aço (adaptada de EZUGWU; WANG, 1997 por MOURA, 2017).

Para Silva (2007), a temperatura de usinagem é influenciada por alguns parâmetros de corte e a interação entre essas variáveis é complexa. Alguns desses parâmetros de corte e seus efeitos são:

- Velocidade de corte: o aumento da velocidade de corte gera um aumento na temperatura de usinagem, pois aumenta a geração de calor. Esse aumento da temperatura acelera com ou aumento do desgaste da ferramenta, o que, conseqüentemente, faz aumentar o contato entre a peça e a ferramenta, e resulta em um aumento da força de corte.
- Avanço: o efeito do avanço é analisado juntamente com a velocidade de corte. Para baixos valores de avanço e baixas velocidades de corte, em geral, há presença de aresta postiça de corte, e quando se faz presente, a principal fonte de calor está afastada da

superfície da ferramenta. Porém, com o aumento da velocidade de corte, a aresta postiça de corte perde estabilidade e a temperatura da ferramenta volta a aumentar com o aumento da velocidade de corte.

- Profundidade de corte: O aumento da profundidade de corte, assim como o avanço, altera as áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, e isso resulta em aumento da força de corte. A quantidade de calor gerado é resultado da força de corte. Logo, um aumento da profundidade de corte implica em um aumento da temperatura.

2.2 Métodos de medição da temperatura de usinagem

A determinação da temperatura de usinagem é de extrema importância, uma vez que essa variável exerce uma influência direta no desgaste da ferramenta e, por consequência, nas condições de corte. No entanto, como destacado por Trent e Wright (2000), a tarefa de determinar a temperatura na interface entre o cavaco e a ferramenta por meio de experimentos não é simples. Diversos fatores complicam a medição da temperatura durante o processo de usinagem, tais como a estreita espessura de cisalhamento, a presença do cavaco que se torna um obstáculo e o fato de que o cavaco está em contato contínuo e em movimento em relação a outros elementos. Essas circunstâncias dificultam o acesso e a medição precisa da temperatura nessa região crítica.

De acordo com Byrne (1987), ao longo do tempo, foram desenvolvidas diversas técnicas de medição de temperatura para avaliar o aumento de temperatura nas zonas de corte durante o processo de usinagem. A maioria dessas técnicas é empregada especificamente para medir a temperatura da ferramenta.

De acordo com Machado *et. al* (2015), os métodos práticos mais utilizados para medição da temperatura na região de formação de cavacos são medição por termopares inseridos na ferramenta; medição da força termoelétrica entre ferramenta e a peça (método termopar ferramenta/peça); medição por radiação de calor com sensores infravermelhos; medição utilizando vernizes termossensíveis; medição por propriedades metalográficas; medição usando pós de sais químicos e medição usando o método do filme PVD. Serão apresentados abaixo os principais métodos utilizados para medição de temperatura de usinagem.

2.2.1 Medição por termopares inseridos na ferramenta

Neste método, são colocados vários termopares com diâmetros pequenos em microfuros distribuídos pela superfície da ferramenta de corte. Essa abordagem permite estimar a variação da temperatura ao longo da superfície da ferramenta. Segundo Silva (2007), os microfuros são criados por meio do processo de eletroerosão. A Figura 3 ilustra a montagem de um termopar em um inserto de metal duro. Esse método tem sido utilizado por pesquisadores como Yen e Wright (1986), Chen, Tsao e Liang (1997) e Kitagawa, Kubo e Maekawa (1997).

No entanto, é importante mencionar que esse método enfrenta algumas dificuldades devido aos altos fluxos de calor presentes na ferramenta. Os grandes fluxos de calor podem comprometer a exatidão das medições realizadas pelos termopares. Além disso, o tempo de resposta dos termopares pode influenciar nos resultados. Outra limitação desse método é a impossibilidade de instalar o termopar na ponta da ferramenta, que é o local onde a temperatura atinge seu valor máximo durante o processo de usinagem. Essa restrição é ressaltada por Cunha (2020).

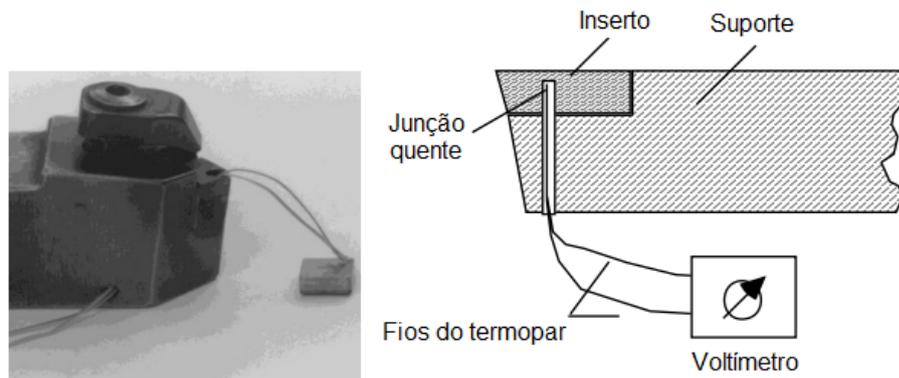


Figura 3 – Exemplo de termopar inserido em um inserto de metal duro (adaptada de ABRÃO, 2004).

2.2.2 Termopar ferramenta/peça

Conforme mencionado por Machado *et al.* (2015), a técnica do termopar ferramenta/peça surge como uma solução eficaz para superar a limitação da técnica do termopar inserido na ferramenta, que não permite a medição direta da temperatura em proximidade da interface entre a ferramenta e o cavaco, ou entre a ferramenta e a peça. Essa abordagem se destaca devido à natureza íntima da interface e às propriedades distintas dos materiais envolvidos nessa região.

A interface entre a ferramenta e a peça pode ser tratada como uma junta de teste ou junta quente, proporcionando a medição mais precisa e direta da temperatura nessa região crítica.

O método do termopar ferramenta/peça mede a temperatura da interface cavaco ferramenta por meio do fenômeno físico denominado “efeito *Seebeck*”. A experiência mostra que um circuito constituído por dois materiais diferentes é percorrido por uma corrente elétrica “*i*” desde que os contatos ou junções destes materiais estejam a temperaturas diferentes (Figura 4). Um circuito deste tipo, denominado par termoelétrico ou termopar, é uma fonte de força eletromotriz. O valor desta força eletromotriz gerada depende somente da natureza dos condutores e da diferença de temperatura entre os dois contatos. Utilizando o princípio do “efeito *Seebeck*”, a temperatura de usinagem pode ser medida. O material da peça e o material da ferramenta constituem um termopar, desde que sejam condutores elétricos. Isto ocorre porque, durante a usinagem, a zona de aderência entre a ferramenta e o cavaco garante a formação de uma junção (junta quente ou junta de medição). Uma conexão elétrica para uma parte de menor temperatura da ferramenta forma a junção fria (junta fria ou junta de referência) (BORCHARDT; GOMES, 1979).

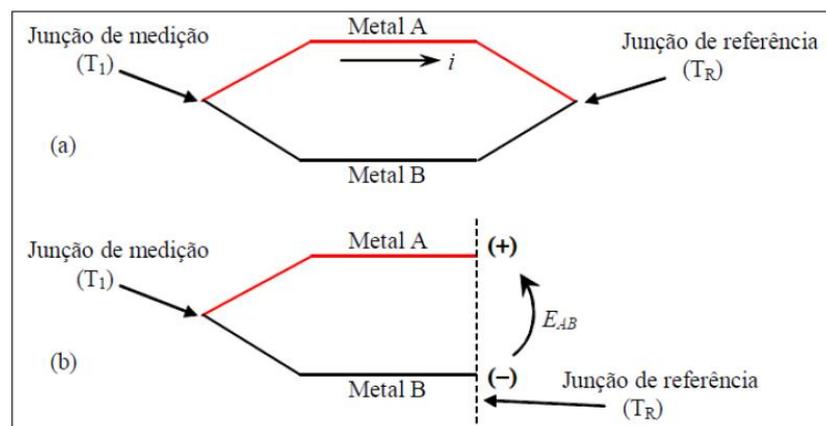


Figura 4 - Representações esquemáticas (a) de um circuito termopar genérico e (b) do circuito com a conexão do sistema de medição do potencial elétrico E_{AB} (KAMINISE, 2012)

A interface entre a ferramenta e a peça é considerada a junção quente do termopar, enquanto a junção fria é formada pelos pontos mais afastados da ferramenta e da peça, que devem ser conectadas eletricamente e mantidas a uma temperatura constante de referência (STEPHENSON e AGAPIOU, 2006). Sendo assim a ddp gerada será relacionada diretamente a temperatura na interface ferramenta/peça, já que teoricamente a temperatura de referência não varia. A Figura 2.5 traz um esquema do método do termopar ferramenta/peça para uma

operação de torneamento cilíndrico externo. Como se pode ver na Figura 5 o sistema deve estar eletricamente isolado. Avelid (1970) diz que, em um sistema como o ilustrado na Figura 5, onde a ferramenta está fixa no castelo do torno, é viável estabelecer a conexão para medição da diferença de potencial (ddp) diretamente na própria ferramenta, utilizando um fio elétrico que se conecta ao instrumento de medição. No entanto, surge um desafio adicional na realização da conexão no outro contato devido à rotação contínua da peça, o que demanda uma abordagem mais complexa para garantir a precisão das medições.

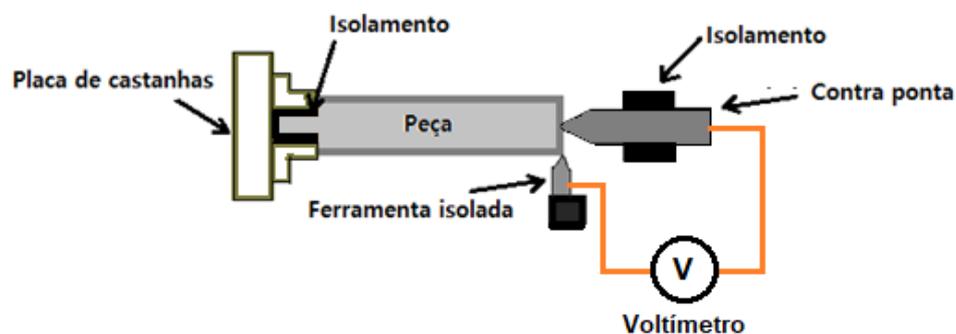


Figura 5 – Esquema do método do termopar ferramenta/peça utilizado na medição da temperatura de usinagem em torneamento cilíndrico externo.

Conforme observado por Ferraresi (1970), o método utilizado por Shore em 1924 foi o primeiro a empregar essa abordagem, trata-se de um método simples e confiável. De acordo com Silva (2007) a temperatura obtida por meio desse método é a mais elevada entre todas as técnicas de medição de temperatura de usinagem e, adicionalmente, é capaz de estabilizar rapidamente.

A técnica, apesar de aparentemente simples, possui uma série de particularidades que devem ser levadas em conta durante sua utilização e montagem. Dentre elas podem-se citar: o par ferramenta-peça deve ser sempre formado por materiais condutores de eletricidade, impedindo assim a utilização de ferramentas cerâmicas e peças de materiais não metálicos; a temperatura medida representa uma média das temperaturas que ocorrem na região de corte, sendo assim não é possível obter o real valor da temperatura máxima da ferramenta na ponta da ferramenta; o contato da ferramenta com o cavaco não é estável, existem picos e vales nesta região; a junção quente pode ser considerada como um termopar finito, com um número infinitamente grande de fontes interligadas em um circuito em paralelo; e a calibração do termopar é difícil pois depende de todos os materiais presentes no sistema e varia para cada material que será usinado (MELO, 1998).

Muitas técnicas para a condução do sinal elétrico já foram desenvolvidas, segundo Kaminise (2012), os métodos mais eficientes para conduzir o sinal elétrico da peça em rotação até o condutor imóvel empregam o uso do mancal de mercúrio. Alvelid (1970) desenvolveu uma técnica que utiliza a própria contra ponta para estabelecer o contato elétrico, e essa abordagem foi aplicada tanto no estudo de Kaminise (2012) quanto no trabalho de Cunha (2020). A Figura 6 apresenta um esquema que ilustra o uso desse tipo de contra ponta específica.

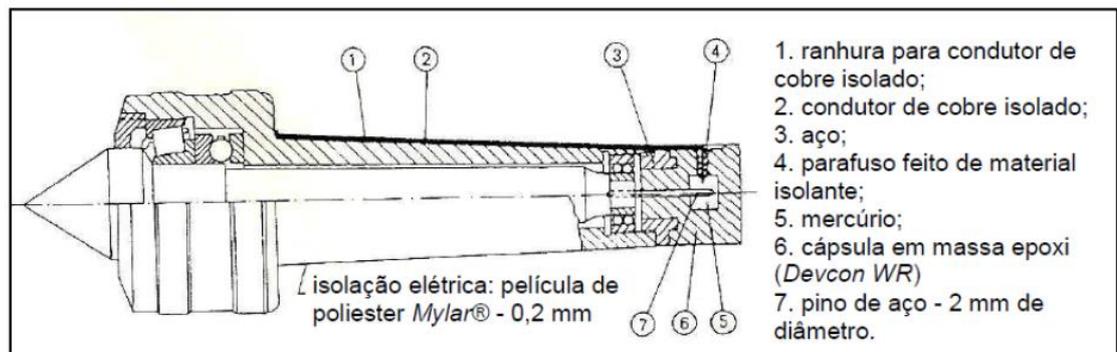


Figura 6 – Contra ponta rotativa convencional que foi modificada para uso no método do termopar ferramenta-peça (ALVELID, 1970)

A calibração do sistema é um fator de extrema importância nesse método. Conforme apontado por Abhang e Hameedullah (2010), a calibração representa um desafio significativo nesse método. De acordo com Tabak (2015), para obter uma calibração precisa, é necessário garantir que todas as juntas que não são pontos de interesse estejam em temperaturas constantes. Essa tarefa apresenta dificuldades, uma vez que ao aquecer o ponto de interesse, o calor se propaga pela ferramenta de corte, afetando todo o corpo da ferramenta, inclusive a junção entre a ferramenta de corte e o fio de cobre, resultando em uma segunda junção com variação de temperatura. Portanto, para medir a temperatura da interface de interesse, durante a calibração, duas temperaturas são monitoradas. A primeira refere-se ao ponto de interesse e é determinada pela média das medidas obtidas por dois termopares soldados o mais próximo possível do contato entre a ferramenta e o cavaco. A segunda temperatura é medida na parte posterior da ferramenta, permitindo que a variação de temperatura nessa junção e a diferença de potencial resultante possam ser subtraídas da equação.

Tabak (2015) conduziu uma análise individual do impacto da variação de temperatura na junção entre a ferramenta de corte e o fio de cobre. Essa abordagem permitiu determinar a magnitude do efeito da junta secundária na calibração inicial. Utilizando a relação entre a

variação de temperatura e a diferença de potencial gerada nesse ponto, foi possível corrigir a calibração inicial e obter uma curva de calibração aprimorada, conforme ilustrado na Figura 7.

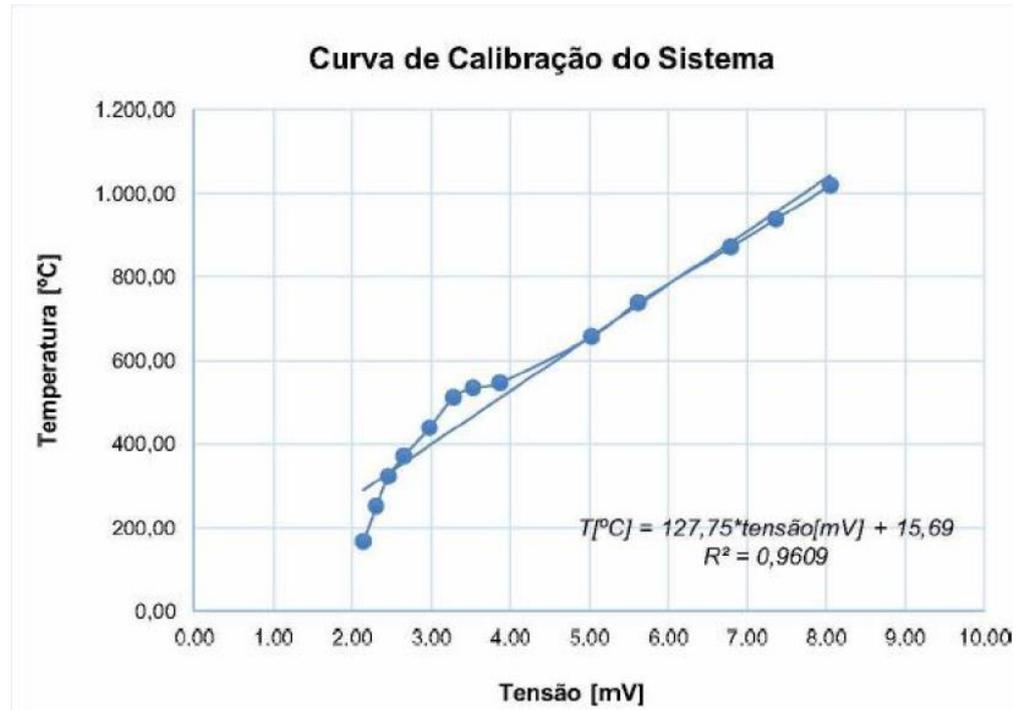


Figura 7 – Curva de calibração para o sistema de medição termopar-ferramenta-peça usando Ti-6Al-4V (adaptado de TABAK, 2015)

Segundo o estudo conduzido por Marques (2015), a temperatura foi monitorada empregando o método do termopar ferramenta/peça, no qual uma ferramenta de corte de metal duro da classe K10 foi utilizada juntamente com o material da peça, o Inconel 718. Para a realização da calibração do sistema, um forno Mufla foi empregado como fonte de calor, conforme representado no esquema apresentado na Figura 8.

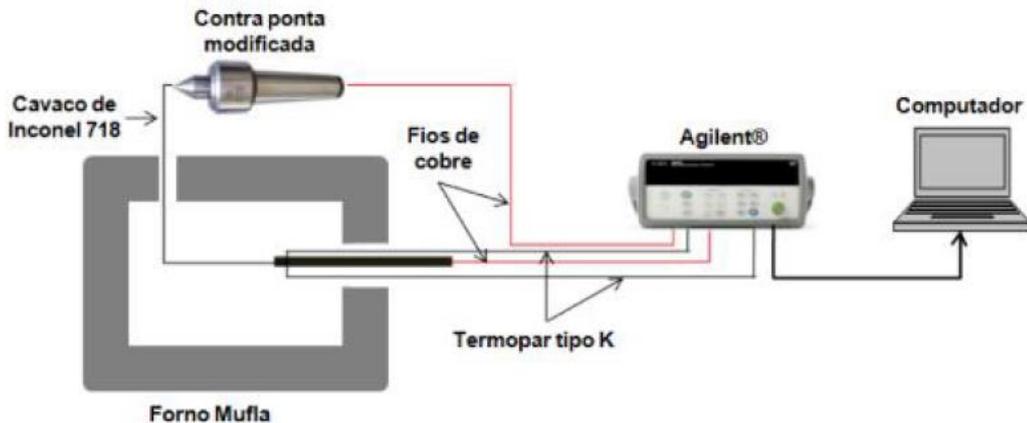


Figura 8 – Diagrama esquemático do sistema de medição termopar ferramenta-peça (Marques 2015),.

2.2.3 Radiação infravermelha

Durante o processo de usinagem, ocorre a geração de calor entre os corpos em contato, e parte desse calor é dissipado por meio de radiação eletromagnética. Essa radiação ocorre em comprimentos de onda que estão na faixa do infravermelho, situando-se entre a luz visível e os micro-ondas. A radiação infravermelha está diretamente relacionada ao calor dos corpos. Para medir a temperatura do calor emitido pelos corpos durante o processo de usinagem, são utilizados dispositivos que empregam a detecção e a medição da radiação infravermelha. Esses aparelhos são capazes de captar o calor emitido e fornecer uma leitura da temperatura.

As ondas de calor atingem a câmera, passam por lentes especiais e, através de um detector, criam sinais elétricos, transformando o espectro infravermelho em um espectro visível, permitindo ver ou medir o calor transferido. Os detectores mais utilizados são os térmicos e os de fótons. Os primeiros mudam sua temperatura quando ocorre variação na quantidade de radiação infravermelha. Isso ocorre porque a mudança na temperatura instantânea dentro do detector produz o sinal elétrico necessário para criar imagens. Os detectores de fótons criam sinais elétricos pela absorção da energia infravermelha na forma de fótons, ou seja, através do efeito fotoelétrico. O detector de fótons é mais utilizado, pois é mais sensível que o térmico e possui foco plano (NICHOLAS e WHITE, 1994).

Este método de medição de temperatura em usinagem, no entanto, só permite a medição em superfícies expostas durante a operação. A sua principal vantagem está no fato de não necessitar contato com a superfície sendo medida. Isto implica em uma medição sem interferência ou perturbação no campo original de temperaturas sendo medidas. Por outro lado,

a presença de fluidos de corte altera a emissão dos raios infravermelhos e a temperatura nas interfaces não podem ser avaliadas por esse método (MACHADO *et. al*, 2015).

2.2.4 Vernizes termossensíveis

Conforme mencionado por Machado et al. (2015), o método de utilização de vernizes termossensíveis é uma técnica em que são empregados vernizes que possuem a propriedade de mudar de cor em resposta a determinadas temperaturas. Essa mudança de cor pode ocorrer devido às propriedades intrínsecas das substâncias presentes no verniz ou como resultado de reações químicas desencadeadas pela temperatura. No entanto, é importante destacar que esses vernizes não são aplicáveis diretamente nas interfaces durante o processo de usinagem, mas sim em superfícies externas e expostas. Eles fornecem uma indicação visual da temperatura atingida nessas regiões e podem ser úteis para fins de monitoramento e controle térmico.

A desvantagem é que o processo químico pelo qual acontece a mudança de cor se desenvolve dentro de um intervalo de tempo, o que gera a inexactidão na avaliação da mudança ocorrida. Além disso, na área de contato, o atrito remove a tinta e não permite uma avaliação precisa dos contornos das isoterms (SILVA, 2007)

2.2.5 Propriedades metalográficas

De acordo com as pesquisas de Wright e Trent (1973), é possível estimar a distribuição de temperatura na ferramenta através de uma inspeção metalográfica. Eles observaram que tanto o aço-carbono endurecido quanto o aço rápido sofrem redução de dureza após serem reaquecidos. As ferramentas de aço-carbono endurecido decrescem sua dureza a partir de 250 °C, e essa redução é ainda mais acentuada após um aquecimento a 600 °C. Por outro lado, as ferramentas de aço rápido não apresentam uma diminuição considerável de dureza até atingirem 600 °C. No intervalo de 600 °C a 850 °C, a dureza dessas ferramentas diminui rapidamente, mas pode aumentar novamente se forem rapidamente resfriadas, possibilitando atingir temperaturas de aquecimento mais elevadas. Por meio da calibração da dureza em relação à temperatura e tempo de aquecimento, é possível obter uma família de curvas específica para cada material de ferramenta.

Dearnley (1983) desenvolveu uma técnica direcionada para ferramentas com insertos de metal duro. Essa técnica envolve a substituição do elemento ligante tradicionalmente utilizado, que é o cobalto, por ferro e ferro-silício, em proporções distintas. Cada um desses elementos

ligantes possui uma temperatura específica de transformação de fase, o que permite a determinação das isothermas nas ferramentas.

Na Figura 9, é apresentada a distribuição de temperatura em função do aumento do avanço, obtida por meio da técnica metalográfica. Nesse contexto, é evidente que há um incremento constante tanto na temperatura quanto na extensão da zona afetada pelo calor à medida que esse parâmetro aumenta.

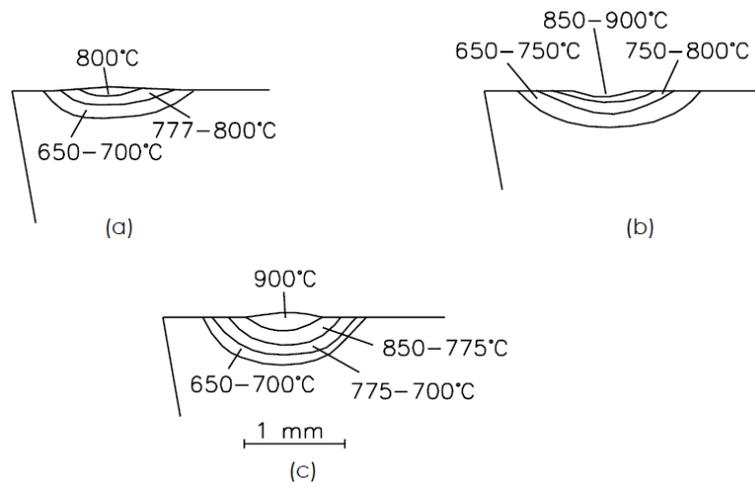


Figura 9 – Influência do avanço nas temperaturas das ferramentas usadas para cortar aço com avanços de (a) $f = 0.125$ mm/rev; (b) $f = 0.250$ mm/rev; (c) $f = 0,500$ mm/rev (TRENT, 1984).

2.2.6 Sais com diferentes temperaturas de fusão

Segundo a abordagem descrita por Machado *et al.* (2015), essa técnica consiste na utilização de sais com pontos de fusão bem definidos, tais como NaCl, KCl, CdCl, PbCl₂, AgCl e KNO₃, para determinar a distribuição de temperatura no corpo da ferramenta de corte. A Tabela 1 apresenta alguns exemplos desses sais, juntamente com suas respectivas temperaturas de fusão.

Tabela 1 – Temperaturas de fusão do NaCl e outros elementos (MACHADO *et. al.*, 2015).

| Composto/elemento | Temperatura de fusão (°C) |
|--------------------------|----------------------------------|
| NaCl | 800 |
| Sb | 531 |
| Zn | 419 |
| Pb | 327 |
| Bi | 272 |
| In | 156 |

Em primeiro lugar, procede-se a divisão do inserto em duas partes de iguais dimensões. Geralmente, esta etapa é realizada por processo de abrasão (retificação) dos insertos, até que estes alcancem a metade do tamanho original. Dois deles são montados de maneira a formarem um bipartido. Com a ferramenta bipartida em mãos, a próxima etapa consiste em umedecer as superfícies retificadas com uma solução de silicato de sódio para melhorar a adesão do sal que será posteriormente espalhado por sobre estas superfícies. Terminadas estas etapas, as partes são unidas e processa-se a usinagem durante um tempo suficiente, até que o sistema entre em regime. Após o corte, a ferramenta é novamente separada e a isotérmica gerada pela fusão do sal é observada. Esta pode ser identificada pela linha gerada entre o sal que sofreu fusão e o que permaneceu sem transformação. Se este processo for repetido com vários tipos de sais (com pontos de fusão diferentes), e com ferramentas de um mesmo material, pode-se determinar a distribuição de temperatura no plano ortogonal à aresta da ferramenta de corte (MACHADO *et. al.*, 2015)..

2.2.7 Filmes depositados por PVD

De acordo com Machado *et al.* (2015), nesse método, são aplicadas camadas finas de diversos materiais, cada um com um ponto de fusão específico, em uma superfície perpendicular à superfície de saída dos insertos de metal duro. Após a deposição do filme de um determinado material, as partes da ferramenta são unidas e submetidas a um processo de usinagem, onde um disco é cortado de forma ortogonal, como representado na Figura 10.

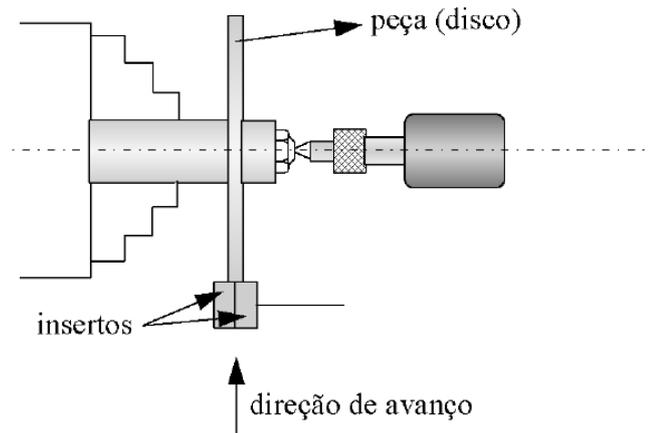


Figura 10 – Montagem experimental para medir a distribuição de temperatura pelo método PVD (Casto et. al., 1994).

2.2.8 Ferramentas inteligentes

Segundo Hopkins (2019), durante os processos de usinagem, é possível medir e controlar a temperatura de corte por meio da integração de sensores, processamento de dados e algoritmos de inteligência artificial (IA). Isso permite a otimização rápida ou o ajuste em tempo real dos parâmetros de corte. Além disso, é possível controlar e reduzir a temperatura de corte utilizando ferramentas de corte projetadas com recursos de extração de calor. Essa combinação de sensores e novas funcionalidades em ferramentas de corte tradicionais resultou no desenvolvimento de um campo emergente conhecido como ferramentas de corte inteligentes.

Campidelli *et al.* (2019) propuseram um avançado sistema de monitoramento de temperatura durante o processo de fresamento do aço AISI D2, que integra um transmissor sem fio Bluetooth diretamente ao porta-ferramenta. Esse sistema elimina a necessidade de conexão física entre o circuito de aquisição de dados e o computador. O sistema de medição é composto por quatro módulos distintos, cada um com sua própria função específica. Esses módulos incluem um sensor (termopar tipo K com sensibilidade de $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$), um circuito de aquisição de dados, um microcontrolador e um transmissor sem fio. A configuração do sistema é ilustrada na Figura 11.

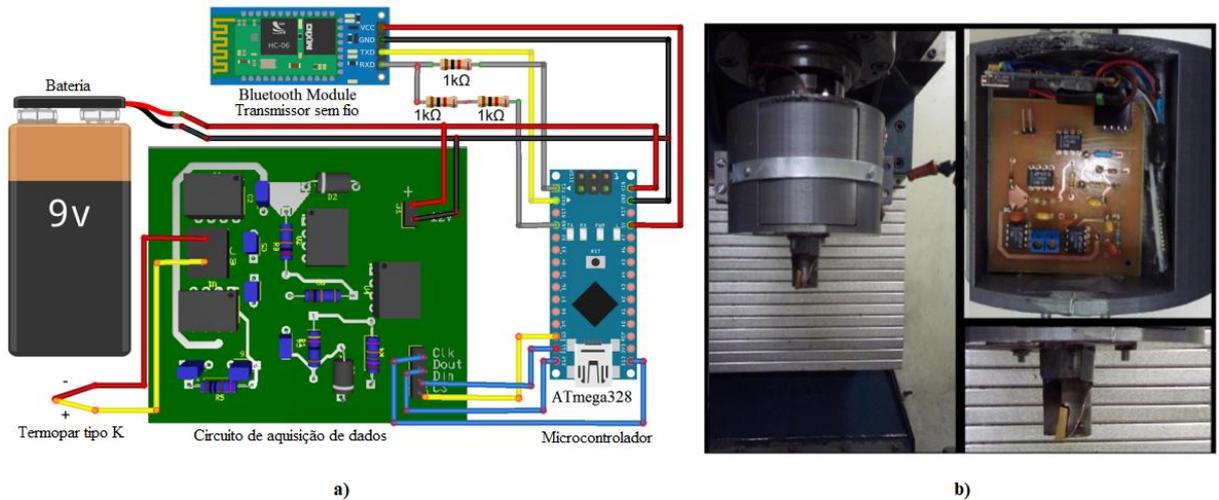


Figura 11- a) Representação esquemática do sistema de aquisição de temperatura; b) sistema de aquisição de dados montado no porta-ferramentas (Campidelli et al. 2019).

De acordo com Guimarães (2022), a utilização de um sistema de comunicação sem fio/Bluetooth em ferramentas de corte possibilita o monitoramento em tempo real da temperatura em diversas condições de trabalho. Isso viabiliza a criação de ferramentas de corte inteligentes capazes de analisar os dados coletados e ajustar os parâmetros de usinagem visando maximizar a vida útil da ferramenta, a taxa de remoção de material, a qualidade do produto e a produtividade, enquanto minimiza os custos de operação. Com o avanço do conceito Machine Tool 4.0, surgem grandes oportunidades para a adoção de métodos numéricos como complemento aos métodos de monitoramento de temperatura em tempo real, além de reduzir os custos de desenvolvimento de novas ferramentas de corte inteligentes.

2.3 Usinabilidade do Titânio

O titânio foi descoberto em 1791, mas foi extraído em sua forma pura somente em 1910. Durante a segunda guerra mundial passou a ser produzido em quantidades significativas. Após esse período, as ligas à base de titânio se tornaram materiais essenciais na indústria aeronáutica. Ressalta-se que ele é o nono elemento mais abundante na crosta terrestre. Entretanto, é pouco encontrado em altas concentrações e não se apresenta em estado puro, tornando seu processamento difícil e, portanto, caro (PETERS *et al.*, 2003).

A obtenção do titânio é feita por meio da ilmenita (FeTiO_3) que é um dos minerais que contém o titânio e está presente na maioria dos minerais da crosta terrestre. A ilmenita foi descoberta por volta de 1791 por William Gregor (BARKSDALE, 1966).

As ligas de titânio se destacam principalmente devido a duas propriedades, excelente resistência à corrosão e a sua elevada resistência a fluência. O que pode explicar a suas aplicações na área aeroespacial, indústria química e também engenharia médica. Quando se trata de altas temperaturas, as ligas de titânio possuem elevada resistência mecânica. Porém, a aplicação da temperatura máxima é limitada pela oxidação da liga. Os Aluminetos de titânio que em parte, superam esta desvantagem, tornaram-se objeto de intensos esforços no desenvolvimento de ligas leves. Enquanto as ligas convencionais de titânio são utilizadas apenas para temperaturas ligeiramente acima de $500\text{ }^\circ\text{C}$, as ligas a base de TiAl podem competir diretamente com os aços especiais (resistentes a elevadas temperaturas) e as superligas a base de níquel (DONACHIE, 1988).

A partir do titânio, a indústria desenvolve inúmeras ligas para aplicações específicas, sendo que, as ligas de titânio apresentam, em geral, resistência mecânica comparável a dos aços, com cerca de 50% de sua densidade. Além disso, as ligas de titânio apresentam uma resistência mecânica 400% superior às ligas de alumínio, com densidade 50 % superior (ANTONIALLI, 2009).

O titânio e suas ligas se destacam comercial e industrialmente devido a suas excelentes propriedades, tais como elevada razão resistência mecânica/massa, manutenção de sua resistência mecânica em temperaturas elevadas e excepcional resistência à corrosão. As principais aplicações destas ligas são nas indústrias aeroespacial e biomédica, em ambientes corrosivos e para a produção de equipamentos industriais avançados utilizados para a geração de energia e transporte (MOODY *et al.*, 1987).

A utilização das ligas de titânio se dá em diversos componentes fabricados pela indústria aeroespacial, sendo sua principal aplicação nas turbinas a gás. Nesta situação, a temperatura de operação é superior a 500°C, o que impede a utilização de outros materiais além do titânio ou das superligas de níquel (EZUGWU et al., 2003).

Segundo Ezugwu e Wang (1997), o titânio puro pode apresentar duas formas alotrópicas diferentes, sendo elas, em temperatura ambiente a fase α que possui estrutura cristalina hexagonal compacta (HC) e a fase β , que é uma transformação alotrópica a 882°C. Determinados elementos de liga têm a capacidade de estabilizar a fase α ou a fase β do titânio, o que resulta em modificações na temperatura de transformação e na extensão do campo α/β . Os Elementos que aumentam a temperatura de transição são chamados de α -estabilizadores, são eles o alumínio (Al), oxigênio (O), nitrogênio (N) e o carbono (C). Dentre estes, o Al que é chamado de α -reforçador, que atua como agente endurecedor muito eficaz em temperaturas ambiente até 550°C e possui a vantagem adicional de ter baixa densidade. Os elementos O, N e C são considerados impurezas em ligas comerciais, apesar disso, O é utilizado como “endurecedor”, conferindo várias combinações de dureza e capacidade de fabricação das ligas. Os elementos estanho (Sn) ou zircônio (Zr) também fortalecem a fase α , porém esses elementos têm pouca influência na temperatura de transformação, pois apresentam extensa solubilidade em α e β e são conhecidos como 'elementos neutros'. Os elementos que produzem uma diminuição na temperatura de transformação são chamados de β -estabilizadores, eles são de dois tipos, β -isomorfos e β -eutetóides. As adições de ligas β -isomorfas mais importantes são molibdênio (Mo), vanádio (V), nióbio (Nb). Os dois exemplos mais importantes do tipo β -eutetóides usados em ligas comerciais são o cobre (Cu) e o silício (Si) que formam compostos intermetálicos.

O titânio é um metal que fornece excelente relação de resistência/peso e boas propriedades para trabalho em alta temperatura. Titânio puro é um material alotrópico, com estrutura cristalina hexagonal compacta (fase α) em baixas temperaturas e uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (fase β) acima de 882 °C. As adições de elementos de liga provocam o efeito de fortalecimento em soluções sólidas com o titânio e alteram a temperatura de transformação alotrópica. A liga Ti6Al4V é um exemplo de sistema bifásico ($\alpha + \beta$) e é a liga mais utilizada na indústria aeroespacial onde sua relação de resistência/peso elevada é uma grande vantagem para economia de combustível (REED, 2006).

De acordo com Knoll and Schaeffer (2006), as ligas de titânio podem ser classificadas em três grupos distintos, com base em suas propriedades metalúrgicas básicas: ligas α , ligas α - β e ligas β . Essas classificações são estabelecidas considerando-se os elementos de liga presentes nas composições das ligas. A Tabela 2 apresenta uma classificação de algumas ligas de titânio, destacando os elementos de liga utilizados em cada uma delas.

Tabela 2 – Classificação das ligas de titânio (Knoll and Schaeffer, 2006).

| Alfa (α) | Alfa-Beta (α- β) | Beta (β) |
|-----------------------------------|--|----------------------------------|
| Ti -0,2Pb | Ti-6Al-4V | Ti-13V-11Cr-3Al |
| Ti-5Al-2,5Sn | Ti-8Mn | Ti-Al-8V-5Fe |
| Ti-8Al-Mo-V | Ti-7Al-4Mo | |
| Ti-6Al-2Co-Ta-Mo | Ti-4Al-3Mo-V | |
| Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo | Ti-3Al-2,5V | |

Conforme destacado por Peters *et al.* (2003), existem mais de 100 ligas de titânio disponíveis, mas apenas cerca de 20 a 30 delas são utilizadas comercialmente. Entre essas ligas, destaca-se a liga Ti-6Al-4V, que oferece um bom equilíbrio de propriedades e tem sido extensivamente desenvolvida, conferindo uma vantagem significativa, especialmente na indústria aeroespacial. Devido a suas características favoráveis, essa liga é a mais amplamente utilizada, correspondendo a mais de 50% do uso comercial de ligas de titânio.

As propriedades mecânicas da liga Ti-6Al-4V dependem da sua microestrutura. Como um exemplo deste fato é a variação das propriedades mecânicas desta liga em função da direção que se está analisando, uma vez que tanto a fase α como a fase β possui tendência em recristalizar com microestrutura texturada. Um controle microestrutural por meio de tratamentos térmicos, processamentos termomecânicos ou termoquímicos têm sido realizados na tentativa de aumentar a resistência e a tenacidade de ligas de titânio (ANKEM *et al.*, 1999).

2.3.1 Usinabilidade do Titânio e suas ligas

Conforme Diniz *et al.* (2003), a usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica que é expressa por meio de um valor numérico comparativo, conhecido como índice de usinabilidade. Esse índice representa um conjunto de propriedades de usinagem de um determinado material em relação a um material de referência. Dessa forma, a usinabilidade pode ser compreendida como o grau de dificuldade de usinar um material específico.

As propriedades de usinabilidade de um material são aquelas que afetam grandezas relacionadas ao processo de usinagem, como a vida útil da ferramenta, o acabamento superficial da peça, os esforços de corte, a temperatura de corte, a produtividade e as características do cavaco. É importante ressaltar que a usinabilidade de um material pode variar dependendo da propriedade considerada. Por exemplo, um material pode apresentar uma boa usinabilidade em relação à vida útil da ferramenta, mas não ter uma boa usinabilidade quando se leva em conta a rugosidade da peça usinada.

A usinabilidade depende do estado metalúrgico da peça, da dureza, das propriedades mecânicas do material, de sua composição química, das operações anteriores efetuadas sobre o material (sejam a frio ou a quente) e do eventual encruamento. (DINIZ ET AL. 2003).

Conforme mencionado por Stemmer (1995), a usinabilidade refere-se à capacidade dos materiais de serem usinados por uma ferramenta de corte. Materiais que apresentam dificuldades de usinagem podem causar problemas para a ferramenta, como desgaste rápido, superaquecimento, acabamento superficial inadequado da peça usinada e altas forças de corte durante o processo, entre outros desafios.

A usinabilidade dos materiais pode ser avaliada em termos de vida da ferramenta, normalmente o mais importante, forças atuantes na ferramenta, potência consumida, acabamento superficial e formação do cavaco (STEMMER, 1995).

Para Childs *et al.* (2000), a usinabilidade de um metal é a sua capacidade de satisfazer os requisitos de produção relacionados ao custo de fabricação. Esses requisitos abrangem vários aspectos, incluindo consumo de energia (ou potência) durante o processo de usinagem, formação e remoção do cavaco, integridade e acabamento superficial da peça usinada, bem como a vida útil da ferramenta.

Conforme Oestreich et al. (2011), a vida útil da ferramenta de corte é frequentemente expressa como o número de peças usinadas antes que a troca ou afiação da aresta de corte seja necessária. Nesse sentido, o objetivo do engenheiro é alcançar uma combinação ideal entre o desempenho da ferramenta, o número de peças fabricadas e a qualidade superficial da peça em uma determinada operação de usinagem. Por meio dessa otimização, é possível aumentar a produção de peças usinadas e reduzir o custo da operação. Essa abordagem busca maximizar o rendimento e a eficiência do processo de usinagem, garantindo que a ferramenta desempenhe sua função por um período adequado antes de requerer manutenção ou substituição.

O titânio e suas ligas são classificados como materiais difíceis de usar. Os principais problemas na usinagem são as altas temperaturas de corte associadas ao grande desgaste da ferramenta. Este desgaste se dá devido à alta afinidade do titânio com a maioria dos materiais constituintes das ferramentas de corte, mesmo em velocidades de corte moderadas onde temperaturas não são as mais elevadas possíveis (FARIAS; BATALHA; DELIJAICOV, 2011).

A baixa usinabilidade do titânio e suas ligas é associada às suas propriedades, como baixa condutividade térmica, alta reatividade química, baixo módulo de elasticidade, alta dureza e resistência a temperaturas elevadas e características peculiares de encruamento, resultando em má usinabilidade (PRAMANIK, 2014; SHAW, 2005).

Conforme Venugopal *et al.* (2007), um dos principais parâmetros que contribui para a má usinabilidade de um material é a baixa condutividade térmica. Quando a condutividade térmica de um material é baixa, durante o processo de usinagem, há uma maior geração de calor na região de corte. Isso pode levar ao aumento das temperaturas locais, o que pode resultar em problemas como desgaste rápido da ferramenta, deterioração da qualidade da peça usinada e maior consumo de energia.

Em um estudo realizado por Moura (2017), a temperatura de corte durante a usinagem do Ti-6Al-4V foi medida com o objetivo de avaliar o efeito da adição de lubrificantes sólidos. O método utilizado para essa medição foi o termopar ferramenta-peça. No trabalho, foram testadas várias condições de corte, como velocidade de corte (variando de 30 a 70 m/min), avanço (entre 0,05 a 0,25 mm/rev) e a presença ou ausência de lubrificação. Os resultados obtidos revelaram valores de temperatura na interface cavaco-ferramenta na faixa de 400 a 1200 °C como pode ser visto na figura 12.

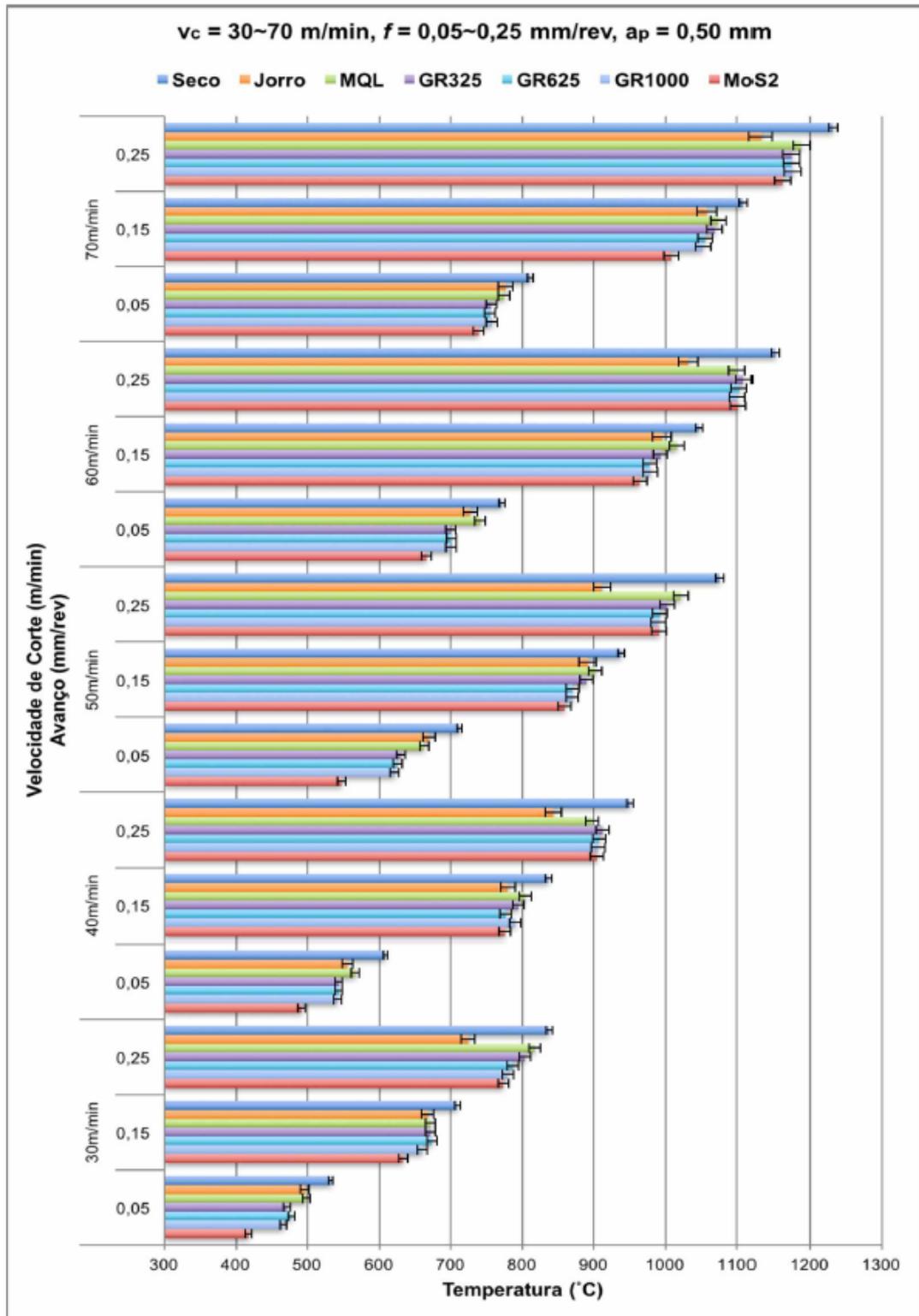


Figura 12- Testes específicos: temperatura de usinagem utilizando a técnica termopar ferramenta-peça, variando v_c de 30 à 70 m/min, f de 0,05 à 0,25 mm/rev e a_p de 0,50 mm (Moura 2017).

No estudo realizado por Cunha (2020), foram comparados diferentes métodos de calibração para o método termopar ferramenta-peça durante a usinagem da liga Ti-6Al-4V. O principal objetivo foi medir e comparar a temperatura na interface cavaco-ferramenta, levando em consideração diferentes parâmetros de corte. O trabalho obteve resultados de temperatura na faixa de 400 a 900 °C conforme aé apresentado na figura 13 abaixo.

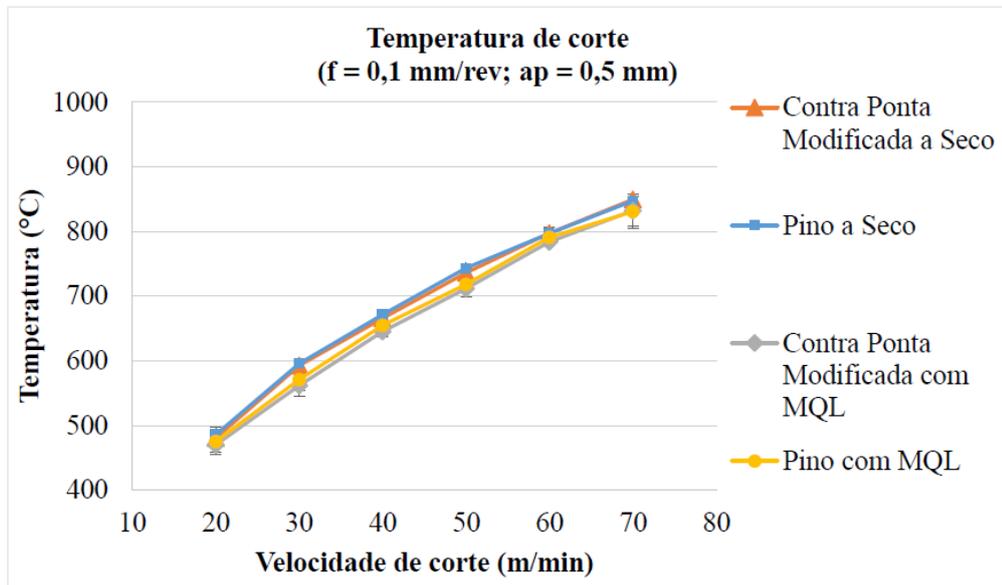


Figura 13 - Temperatura de usinagem em função da velocidade de corte (Cunha 2020).

Segundo a literatura, praticamente toda energia mecânica relacionada a formação do cavaco é convertida em calor. A quantidade de calor gerado na região de corte sofre influência da velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e tempo de corte, isto é, quanto maior os parâmetros de usinagem citados, maior será a temperatura de corte da zona de corte. A baixa condutividade térmica causa concentração de calor na aresta de corte e na superfície de saída da ferramenta, influenciando negativamente na vida da ferramenta de corte (DAVIM, 2008; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Conforme relatado por Davim (2008), a temperatura na zona de corte é um parâmetro crítico que possui influência direta sobre diversas variáveis no processo de usinagem. Essa temperatura afeta significativamente as forças de corte durante a operação, a vida útil da ferramenta, a taxa de desgaste da ferramenta e a integridade superficial da peça usinada.

Conforme apontado por Moreira *et al.* (2004), a liga Ti-6Al-4V apresenta alta reatividade química com o material da ferramenta de corte, o que contribui para a baixa usinabilidade dessa liga. A presença de titânio na composição química desses materiais pode resultar em desgaste por difusão, como ilustrado na Figura 14.

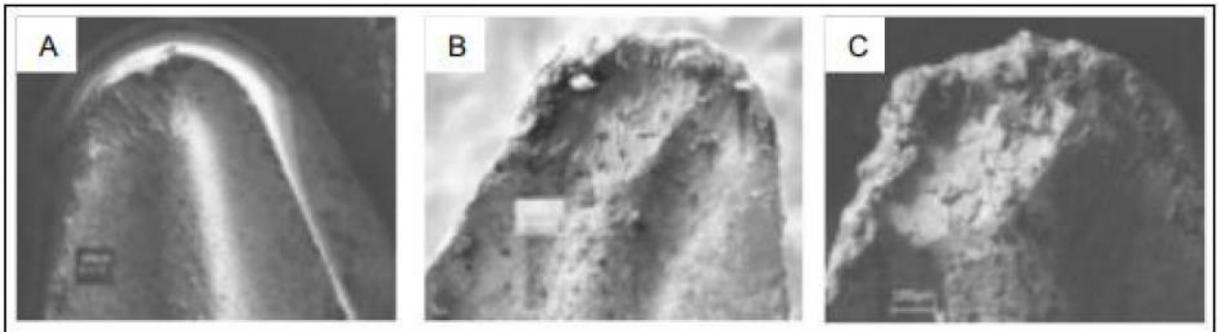


Figura 14 - Desgaste de ferramenta ISO S15 na usinagem de titânio a em três diferentes velocidades de corte: A) 85 m/min; B) 100 m/min; C) 120 m/min (MOREIRA *et al.*, 2004)

Todos os materiais que são comumente usados como ferramenta de corte reagem com ligas de titânio a altas temperaturas operacionais, devido a afinidade química entre a liga de titânio e os materiais de ferramenta, pois o titânio é presente na composição química desses materiais, o que estimula o desgaste por difusão (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014; KLOCKE, 2011).

Outro fator que contribui na baixa usinabilidade do titânio e suas ligas é a presença de altas tensões nas imediações da aresta de corte, segundo Ezugwu e Wang (1997), isso ocorre devido à pequena área de contato cavaco ferramenta na superfície de saída da ferramenta e à alta resistência à deformação a temperaturas elevadas. Além disso, por causa do baixo módulo de elasticidade das ligas de titânio, pode ocorrer chatter no processo de usinagem, o que dificulta a usinagem desse material. Portanto, o sucesso na usinagem das ligas de titânio depende, principalmente, da superação dos principais problemas associados às propriedades inerentes a esses materiais.

2.3.2 Efeitos da geometria da ferramenta de corte na usinabilidade

Segundo Rodrigues (2005), a geometria da ferramenta de corte desempenha um papel fundamental no processo de usinagem. Pequenas variações dimensionais e angulares podem resultar em diferentes comportamentos do material a ser usinado na aresta de corte da ferramenta. Portanto, a geometria da ferramenta representa uma variável de extrema importância no processo de usinagem.

Diversos elementos constituintes da geometria das ferramentas de corte podem ser modificados visando otimizar seu desempenho. Os seguintes elementos da cunha cortante podem ser combinados: raio de ponta r_ϵ , ângulo da saída γ_o , ângulo de folga α_o , ângulo de inclinação λ , ângulo de posição χ , quebra-cavaco, chanfro da aresta de corte, raio da aresta de corte, entre outros (RODRIGUES 2005).

Segundo Machado et al. (2015), o ângulo de saída (γ_o), que geralmente varia de -8° a 20° , tem um impacto significativo na força e na potência necessárias para o corte, no acabamento superficial e na temperatura de corte. O valor do ângulo de saída é influenciado pela resistência mecânica dos materiais da ferramenta e da peça, pela velocidade de avanço e pela quantidade de calor gerado durante o processo de usinagem.

De acordo com Wertheim *et al.* (1994), no torneamento, são comumente empregados ângulos de saída positivos. Essa escolha visa minimizar a energia de corte e a geração de calor durante o processo.

Conforme Machado *et al.* (2015), o ângulo de folga (α_o) varia entre 5° e 20° e desempenha uma função primordial: evitar o atrito entre a peça e a superfície folgada da ferramenta. Quando o ângulo de folga é muito baixo, a cunha não penetra adequadamente na peça, resultando no desgaste prematuro da ferramenta de corte e comprometendo o acabamento da peça. Por outro lado, se o ângulo de folga for muito elevado, a cunha de corte perde sua resistência, podendo até se quebrar. O valor do ângulo de folga depende, principalmente, da resistência mecânica da peça e da ferramenta de corte: quanto maior a resistência, menor o ângulo necessário. Kaldor e Malkin (1986) afirmam que existe um valor ótimo que maximiza a vida útil da ferramenta.

De acordo com que diz Fitzpatrick (2013), quando não há folga entre a peça e a superfície folgada da ferramenta, ocorre um aumento excessivo de atrito, resultando na geração de calor. Esse acúmulo de calor pode levar ao superaquecimento tanto da peça quanto da própria ferramenta de corte.

Vários estudos sobre otimização da geometria de corte já foram realizados, especialmente em operações de torneamento, fresamento e furação. Geralmente, o grande objetivo dos estudos refere-se à maximização da vida da ferramenta. Pequenas modificações na aresta cortante podem aumentar a resistência mecânica, prolongando a vida da ferramenta e melhorando o acabamento superficial da peça (RODRIGUES 2005).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, será apresentada a metodologia utilizada no experimento de torneamento da liga Ti-6Al-4V, além de fornecer informações sobre os materiais e equipamentos utilizados neste estudo.

Como os ensaios foram conduzidos com o objetivo de medir as temperaturas na interface cavaco-ferramenta durante o processo de torneamento da liga Ti-6Al-4V. Nesses ensaios, foram variadas a geometria da ferramenta e a velocidade de corte, utilizando o método do termopar-ferramenta-peça. A curva de calibração será obtida seguindo a metodologia de calibração descrita por Cunha (2020).

Todos os testes foram realizados em um processo de torneamento cilíndrico externo da liga de titânio. Durante esses testes, a geometria da ferramenta foi variada, utilizando-se seis ferramentas de corte diferentes, de metal duro da classe K10 e sem revestimento. Além disso, a velocidade de corte também foi variada.

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Usinagem Convencional (LUC) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), localizada na cidade de Uberlândia, Minas Gerais.

3.1 Material da peça

O material da peça utilizada foi a liga de titânio Ti-6Al-4V, também conhecida como ASTM F136 Grau 5. Esse mesmo material foi utilizada pelos alunos Ricardo Ribeiro Moura e Renato Nunes Cunha (Figura 15) em suas respectivas tese (MOURA 2017) e dissertação (CUNHA 2020). Na tese de Moura, o material já havia sido caracterizado (Figura 16) por meio de ensaios de dureza e microdureza, revelando que os valores obtidos estavam dentro dos padrões estabelecidos pelo fabricante, situando-se entre 30 e 36 HRC.



Figura 15 - Peça da liga de titânio Ti-6Al-4V utilizada nos ensaios.

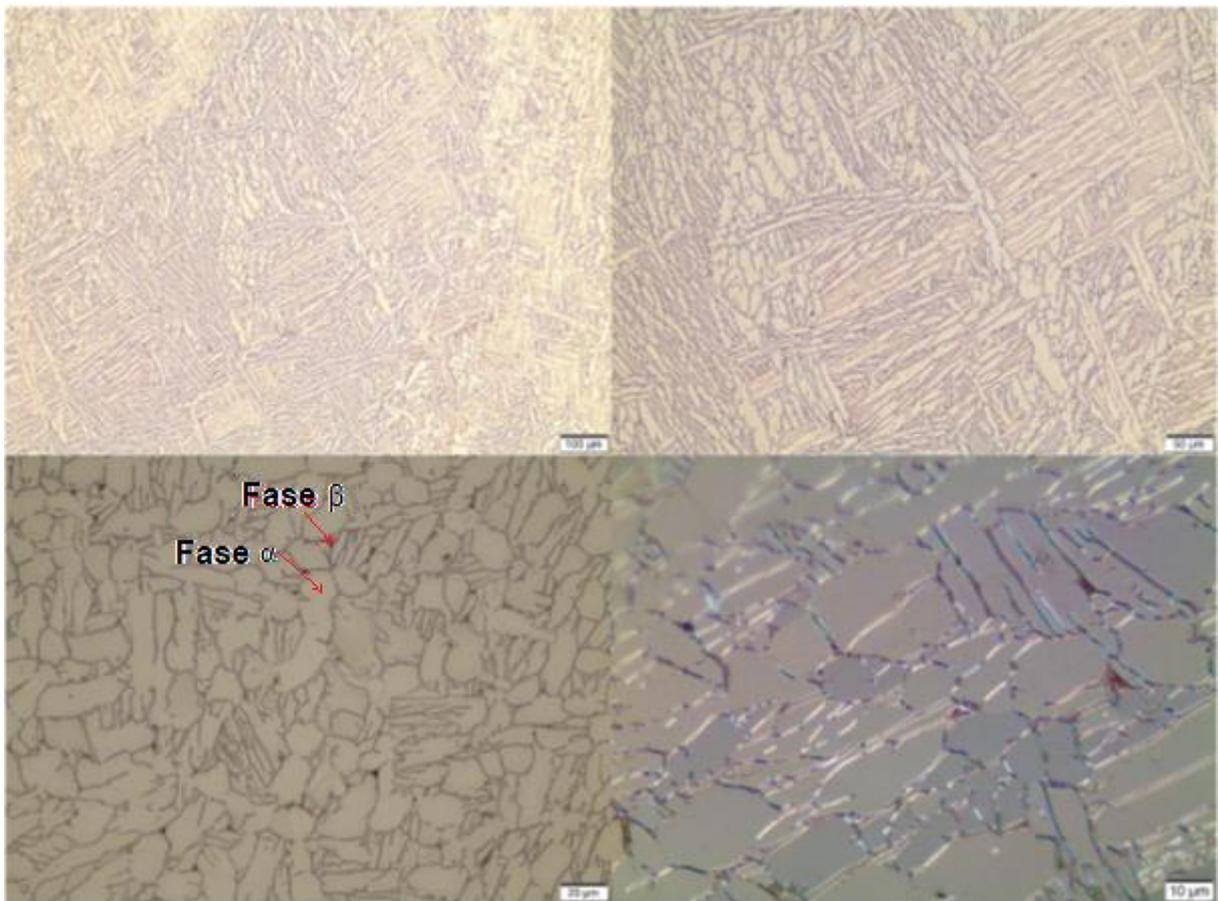


Figura 16 - Microestrutura da liga Ti-6Al-4V (Adaptado de MOURA, 2017)

De acordo com Moura (2017), a análise microscópica da liga Ti-6Al-4V em diferentes ampliações revela uma microestrutura típica do tipo Widmanstätten. Nessa microestrutura, observa-se que as linhas finas escuras correspondem à fase β (CCC), enquanto as placas brancas aciculares representam a fase α (HC). Essas fases α se formam dentro da matriz β .

A composição química da liga Ti-6Al-4V, conforme fornecida pelo fabricante, está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química da liga Ti-6Al-4V (MOURA, 2017)

| Limites de impureza (% peso) | | | | | | |
|-------------------------------------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| N | Fe | O | C | H | Al | V |
| 0,03 | 0,40 | 0,20 | 0,08 | 0,01 | 5,50~6,75 | 3,50~4,50 |

3.2 Ferramentas de corte

Foram utilizadas ferramentas de metal duro em forma de barra, nas dimensões 10x10x80 mm de metal duro da classe K10 e sem revestimento. As ferramentas foram afiadas em uma afiadora universal AtlasMaq com potência de 0,75 HP, equipada com um rebolo de diamante K-11V9-100-2-10-31,75-D151 conforme ilustrado na Figura 17. Cada barra de metal duro foi afiada nas duas extremidades e medido por meio de um microscópio ótico OLYMPUS LG – PS2 resultando em um total de seis geometrias diferentes, duas nas extremidades da ferramenta A, duas para ferramenta B e duas para ferramenta C. As geometrias específicas das ferramentas podem ser encontradas na Tabela 4.

As barras de metal duro utilizadas no torneamento, juntamente com a barra empregada na calibração do sistema de medição de temperatura, foram provenientes do mesmo lote (conforme ilustrado na Figura 18). Essa escolha foi feita com o objetivo de minimizar a influência que diferentes lotes de ferramentas poderiam ter nos resultados.



Figura 18 – ferramentas de corte utilizadas.

3.3 Equipamentos

A temperatura de usinagem foi obtida por meio de ensaios realizados em um torno eletrônico universal Nardini, modelo Revolution RV-220, com uma rotação máxima de 2500 rpm e potência de 7,46 kW (conforme ilustrado na Figura 19).



Figura 19 - Torno eletrônico universal Diplomat® modelo Revolution RV-220 utilizado nos testes.

3.4 Contra pontas modificada

O contra ponta modificada utilizado neste trabalho foi desenvolvido no estudo de Kaminise (2012) e baseado no método descrito por Alvelid (1970). Esse contra ponta consiste em uma cápsula de Teflon® inserida dentro do cone Morse. No interior dessa cápsula, é adicionado mercúrio para permitir a continuidade do sinal elétrico.

Conforme descrito por Kaminise (2012), o circuito elétrico é estabelecido entre a ponta rotativa e uma haste instalada na carcaça do contra ponta, com a devida isolação elétrica. A continuidade do circuito é garantida por meio de um prolongamento cilíndrico que fica inserido dentro da cápsula de Teflon®, mantendo contato contínuo com o mercúrio. Tanto a ponta rotativa quanto a haste foram fabricadas a partir do mesmo material (SAE 1050), garantindo a junção de materiais similares e evitando a geração de uma diferença de potencial prejudicial (de acordo com a segunda lei dos termopares). Um fio de cobre foi soldado na haste, externamente à contra ponta, para fechar o circuito com o sistema de medição. A isolação elétrica no cone Morse da contra ponta foi alcançada por meio da aplicação de pintura eletrostática à base de resina epóxi. A Figura 20 apresenta todos os componentes da contra ponta modificada.

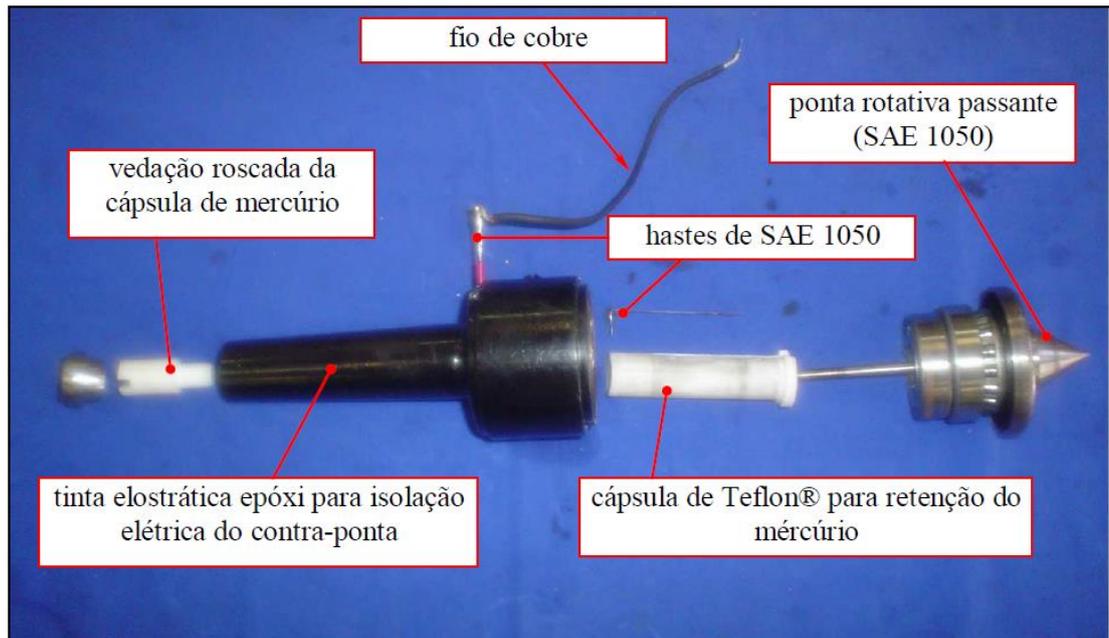


Figura 20 - Componentes da contra ponta rotativa modificada utilizada (KAMINISE, 2012)

3.5 Medição da temperatura de usinagem

A temperatura da interface cavaco-ferramenta foi obtida no torneamento cilíndrico externo, utilizando o método do termopar ferramenta-peça. A figura 21 ilustra a montagem experimental.

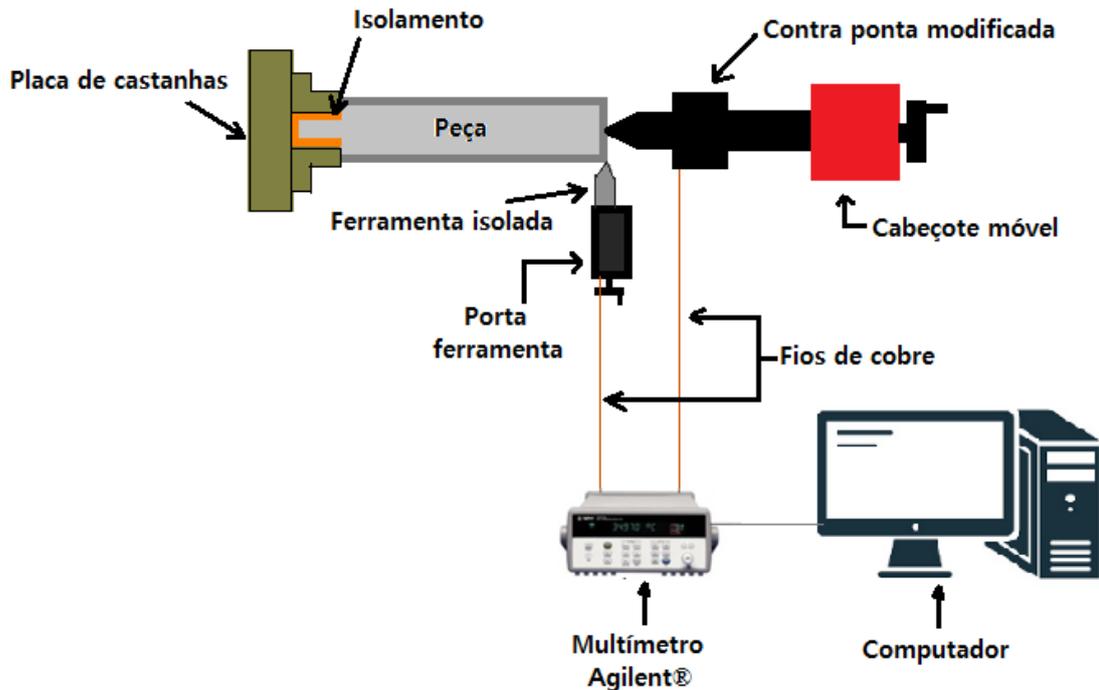


Figura 21 - Desenho esquemático do sistema de medição de temperatura.

De acordo com o esquema ilustrado na Figura 21, foram adotadas medidas de isolamento durante o processo. A peça de titânio foi isolada através do envolvimento de folhas de lixa com fita isolante na área de contato entre a peça e a castanha de fixação do torno. O suporte da ferramenta de corte foi completamente envolto por fita isolante, garantindo o isolamento em relação ao castelo da máquina. O contra ponta modificada, que contém mercúrio líquido, fecha o circuito na outra extremidade. O cone Morse do contra ponta modificada foi revestido com tinta epóxi isolante e também foi utilizada fita isolante para assegurar o isolamento adequado. Esses sistemas de isolamento podem ser visualizados na Figura 22.

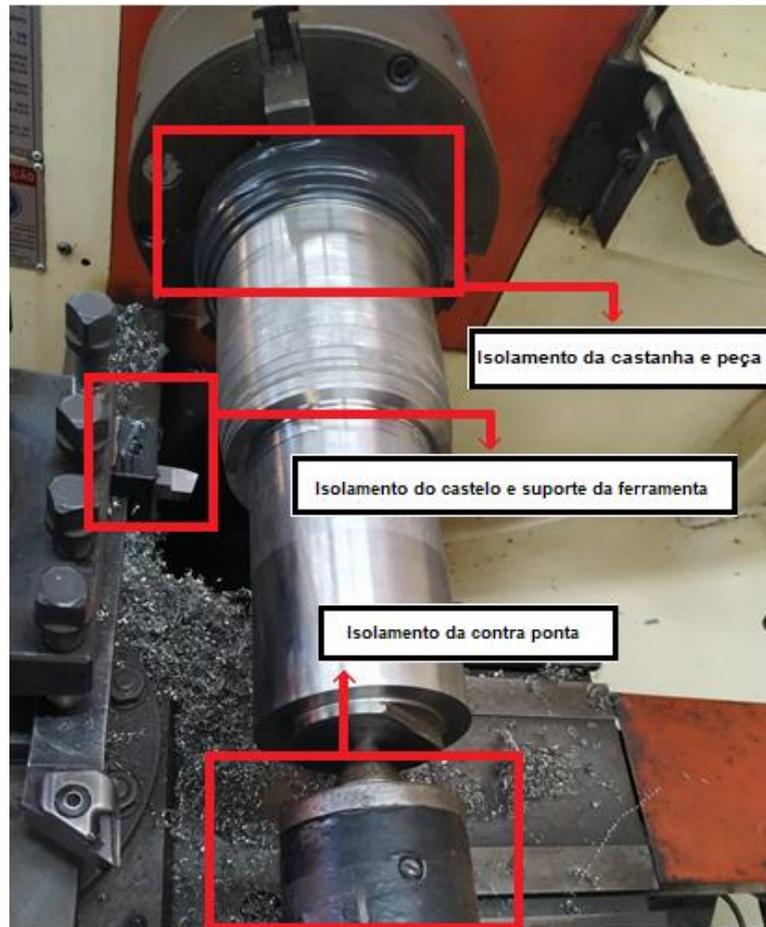


Figura 22 - Aparato experimental evidenciando todas as partes devidamente isoladas.

Durante o processo de torneamento, a diferença de potencial (ddp) gerada é proporcional à diferença de temperatura entre a interface ferramenta-peça e a temperatura ambiente. A coleta dessa ddp foi realizada utilizando o mesmo método empregado no trabalho de Cunha (2020). Após a coleta, a ddp foi amplificada e enviada para uma placa de aquisição de sinais *Agilent® 34901A*, fabricada pela *KEYSIGHT®*. Essa placa possui uma resolução de $1 \mu\text{V}$ e uma incerteza de medição de $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$. A aquisição dos dados foi feita por meio de um computador utilizando o software *Agilent® BenchLink Data Logger*, que é compatível com a placa de aquisição.

A aquisição do sinal é realizada por meio de um fio de cobre, e o sistema possui uma taxa de aquisição de 1 segundo. Após aguardar a estabilização da ddp, a medição é feita por aproximadamente 10 segundos, e em seguida o ensaio é interrompido. O software gera um arquivo com os valores obtidos durante o processo de usinagem. Em seguida, é calculada a média desses valores, permitindo estabelecer a relação entre a ddp e a temperatura real da interface.

Os sinais de ddp foram medidos duas vezes para cada condição de corte durante os ensaios.

Os testes foram realizados com a utilização de alguns parâmetros de corte semelhantes aos utilizados por Cunha (2020), a fim de permitir comparações com os resultados obtidos anteriormente. Esses parâmetros incluíram a velocidade de corte (V_c) variando de 20 a 70 m/min, a profundidade de corte (a_p) de 0,5 mm e o avanço (f) de 0,1 mm/volta. Além disso, foram adicionados novos parâmetros de corte, como a velocidade de corte de 80 m/min e diferentes geometrias da ferramenta de corte, que constituem o foco principal deste trabalho. Conforme mencionado anteriormente no tópico 3.2, foram utilizadas três ferramentas de corte (A, B e C) do mesmo lote, e para cada ferramenta, a velocidade de corte foi variada. Todos os parâmetros de corte utilizados nos ensaios para medição de temperatura estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Ângulos de folga e de saída e velocidade de corte utilizados.

| Ferramenta | Ângulo de folga (α_o) | Ângulo de saída (γ_o) | Velocidade de corte (V_c) [m/min] |
|-------------------|--|--|---|
| A1 | 4,5° | 0° | 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 |
| A2 | 4,5° | 5° | 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 |
| B1 | 2° | 0° | 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 |
| B2 | 2° | 5° | 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 |
| C1 | 7° | 0° | 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 |
| C2 | 7° | 5° | 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 |
| C3 | 7° | 11,5° | 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 |
| C4 | 7° | 16,5° | 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 |

3.6 Calibração do termopar ferramenta-peça

A calibração do sistema termopar-ferramenta-peça desempenha um papel fundamental na medição precisa e confiável das temperaturas durante o processo de usinagem. Seu objetivo é estabelecer uma relação precisa entre as variações de temperatura na interface entre a ferramenta e a peça e a temperatura ambiente, levando em consideração o valor correspondente da diferença de potencial termoelétrico, que é influenciado pelo efeito Seebeck. Em resumo, a calibração desse sistema é essencial para obter medições de temperatura com precisão e confiabilidade durante o processo.

A calibração do sistema neste trabalho foi conduzida utilizando um forno mufla juntamente com o mesmo torno e componentes empregados nos ensaios de usinagem. Essa abordagem permitiu que o sistema de calibração fosse realizado de maneira consistente, seguindo o mesmo procedimento adotado por Cunha (2020).

Uma junta formada por uma barra de metal duro de dimensões aproximadas de 5x5x320 mm e um fio do mesmo material do corpo de prova, é colocada dentro do forno. O fio é conectado ao corpo de prova, que está montado no torno. A outra extremidade da barra de metal duro é conectada ao sistema de aquisição.

A peça está montada no torno e em contato com o contra-ponta modificada e, por meio dela, outro fio de cobre foi conectado para fechar o circuito no multímetro Agilent®. A Figura 23 ilustra o esquema montado para a calibração.

Com o sistema devidamente preparado, o forno mufla é aquecido até atingir a temperatura de 1000 °C, que é a temperatura limite do metal duro. O aquecimento do forno provoca a variação de temperatura na junção entre a ferramenta e o cavaco, gerando dados que são adquiridos pelo multímetro Agilent® e enviados ao computador.

Esses dados permitem a construção da curva de calibração do sistema, que relaciona as variações de temperatura na junção ferramenta-cavaco com os valores registrados pelo multímetro.

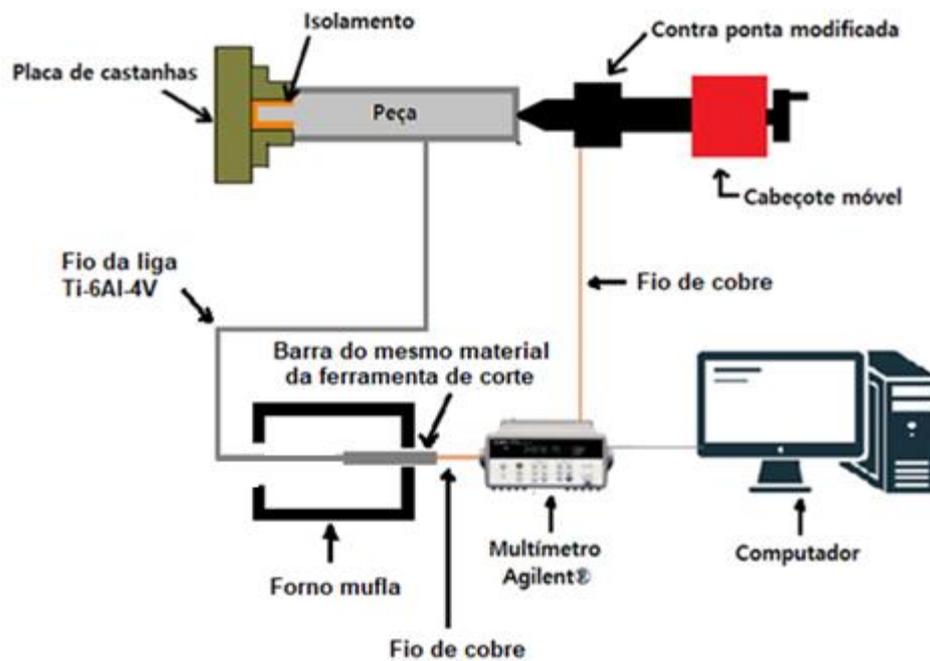


Figura 23 – Esquema do sistema montado para adquirir a curva de calibração.

Todos os componentes do sistema que não foram aquecidos durante os testes de usinagem mantiveram-se em temperatura ambiente, que estava em torno de 25 °C.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados todos os resultados obtidos ao longo da pesquisa, acompanhados de uma análise abrangente e discussões relevantes a respeito deles.

4.1 Obtenção da Curva de Calibração do Sistema Termopar Ferramenta-Peça

Com base no trabalho de Cunha (2020), foi adotada uma abordagem diferente para a calibração do sistema termopar ferramenta-peça. Nessa configuração, o forno foi posicionado próximo ao torno, permitindo que o par ferramenta-peça fosse submetido ao aquecimento controlado nas mesmas condições do processo de usinagem. Essa abordagem oferece a vantagem de refletir as condições reais do experimento, proporcionando uma calibração mais precisa.

Portanto, com base no trabalho de Cunha (2020), a calibração do sistema termopar ferramenta-peça foi realizada utilizando a mesma configuração do experimento de usinagem, com o forno posicionado próximo ao torno. Essa abordagem busca garantir a fidelidade das medições de temperatura durante o processo de usinagem.

No experimento de calibração, utilizou-se um fio comercial da liga de titânio Ti-6Al-4V com diâmetro de 1,7 mm. Esse fio de titânio foi ligado a uma barra de metal duro por meio de uma abraçadeira de aço 1045.

Foram conduzidas 20 medições de temperatura, abrangendo o intervalo de 186 °C a 985 °C. O limite superior de 985 °C foi estabelecido devido à natureza da barra de metal duro, a qual se desintegra ao atingir temperaturas em torno de 1000°C. Essas medições permitiram a obtenção de pontos de calibração em proximidade a 1000 °C, proporcionando, assim, uma faixa abrangente de valores para a curva de calibração.

Após a realização dos procedimentos foi obtido a curva de calibração, essa curva foi utilizada para quantificar a temperatura atingida na interface cavaco-ferramenta durante os experimentos de usinagem.

Com base na curva de calibração, torna-se viável determinar a temperatura na interface cavaco-ferramenta durante os experimentos. Ao realizar a medição do sinal de DDP na região da interface, é possível utilizar a curva de calibração para converter esse sinal em uma temperatura correspondente de forma precisa e confiável.

A temperatura de usinagem é determinada utilizando a equação polinomial obtida pela curva de calibração, que está representada pela equação 4.1. A figura 24 ilustra a curva de calibração obtida. É importante observar que a curva de calibração apresenta coeficientes de correlação (R^2) superiores a 0,99, o que indica uma boa repetibilidade dos resultados e garante a confiabilidade das medições.

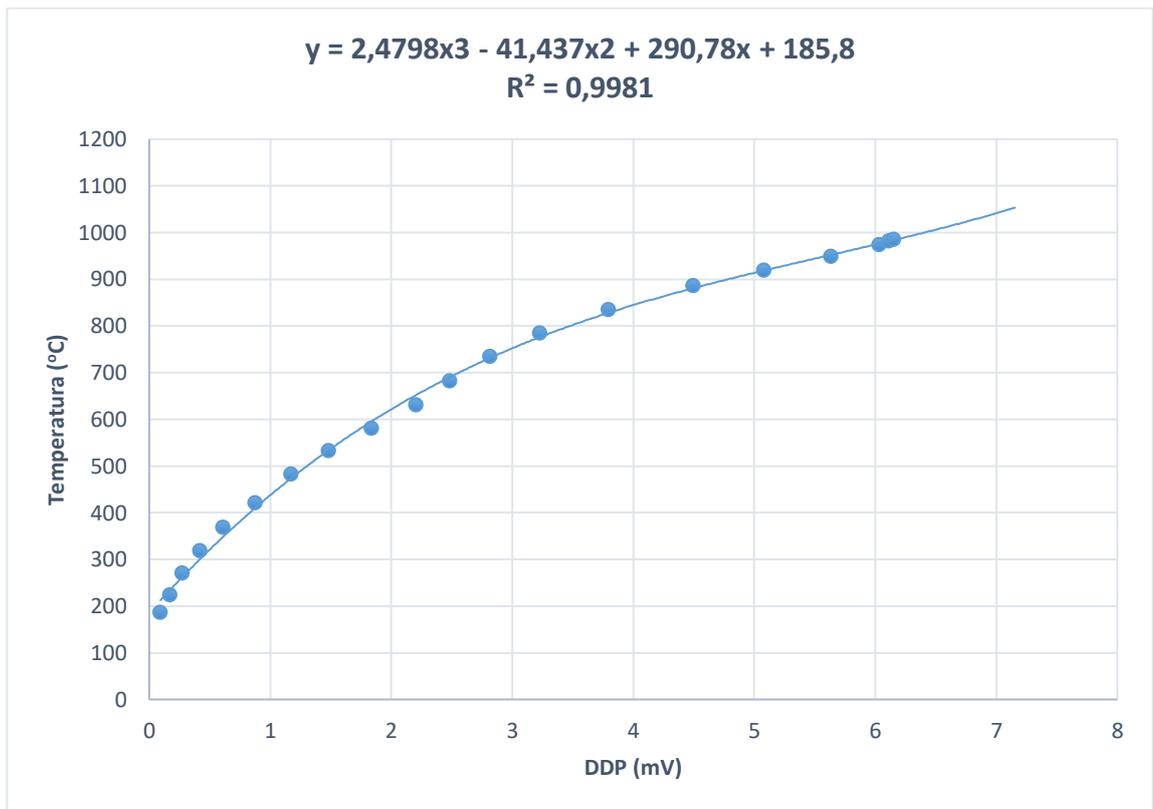


Figura 24 – Curva de calibração do sistema termopar ferramenta-peça.

$$T_u = 2,4798V^3 - 41,437V^2 + 290,78V + 185,8 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (4.1)$$

De acordo com a equação 4.1, a temperatura de usinagem (T_u) é dada em função da diferença de potencial (DDP) V, medida em milivolts (mV).

4.2 Medição da temperatura de usinagem

Após a obtenção dos resultados de diferença de potencial em função do tempo de operação, foi calculada a média dos valores de diferença de potencial para cada condição de corte, considerando a variação tanto da velocidade quanto da geometria da ferramenta de corte. Em seguida, utilizando uma curva de calibração, os valores médios de diferença de potencial foram convertidos em temperatura de usinagem. Dessa forma, foi possível estabelecer uma relação entre a temperatura de usinagem e a velocidade de corte para cada uma das geometrias das ferramentas testadas.

4.3 Temperatura variando a velocidade de corte

A fim de examinar os efeitos da variação da velocidade de corte, foram utilizados os seguintes parâmetros de corte: profundidade de corte (a_p) de 0,5 mm e avanço (f) de 0,1 mm/volta para todas as ferramentas de corte utilizadas. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Médias das temperaturas obtidas em todos os ensaios

| Vc[m/min] | A1 [°C] | A2 [°C] | B1 [°C] | B2 [°C] | C1 [°C] | C2 [°C] | C3 [°C] | C4 [°C] |
|---------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 20 | 793 | 748 | 758 | 738 | 764 | 719 | 766 | 739 |
| Desvio Padrão - 20 | 13,60 | 12,19 | 18,01 | 14,04 | 15,11 | 18,44 | 18,35 | 16,84 |
| 30 | 859 | 826 | 842 | 823 | 846 | 811 | 824 | 809 |
| Desvio Padrão - 30 | 9,86 | 11,39 | 11,99 | 12,24 | 11,46 | 14,09 | 14,41 | 13,49 |
| 40 | 922 | 883 | 903 | 873 | 905 | 886 | 878 | 858 |
| Desvio Padrão - 40 | 8,67 | 9,27 | 11,11 | 9,38 | 9,33 | 10,50 | 14,51 | 12,08 |
| 50 | 967 | 922 | 945 | 915 | 948 | 917 | 934 | 903 |
| Desvio Padrão - 50 | 7,02 | 6,92 | 9,76 | 7,42 | 9,63 | 8,63 | 9,37 | 8,62 |
| 60 | 997 | 956 | 979 | 941 | 989 | 952 | 967 | 939 |
| Desvio Padrão - 60 | 8,97 | 8,39 | 8,64 | 9,08 | 7,93 | 8,36 | 10,61 | 7,87 |
| 70 | 1024 | 979 | 1009 | 970 | 1011 | 991 | 992 | 958 |
| Desvio Padrão - 70 | 6,96 | 7,07 | 7,03 | 8,69 | 8,72 | 11,30 | 8,91 | 6,66 |
| 80 | 1056 | 997 | 1035 | 997 | 1036 | 1026 | 1019 | 997 |
| Desvio Padrão - 80 | 6,60 | 8,33 | 9,42 | 11,51 | 12,80 | 8,94 | 11,34 | 9,73 |

É fundamental destacar que todos os valores de temperatura acima de 985 °C (indicados em amarelo na Tabela 4.1) foram obtidos por meio de extrapolação. Isso ocorreu devido à limitação da curva de calibração, que só foi estendida até o valor de 985 °C. Portanto, não se tem informações sobre o comportamento da curva de calibração além desse ponto.

Observa-se que os valores de temperatura situam-se na faixa de 719 °C a 1056 °C. É importante ressaltar que a maioria desses valores está dentro do intervalo esperado de acordo com a curva de calibração. Isso indica que os resultados obtidos estão alinhados com as previsões e corroboram a confiabilidade do método de medição utilizado.

A Figura 25 ilustra as curvas de temperatura em relação à velocidade de corte, utilizando os valores da Tabela 6. É notável que a geometria da ferramenta de corte que se destacou pela menor geração de calor foi a da ferramenta C4, caracterizada por um ângulo de saída de 16,5° e um ângulo de folga de 7°. Assim, essa configuração se revelou a mais eficaz na usinagem dessa liga de titânio. Também é evidente que o aumento da velocidade de corte resulta em um aumento correspondente da temperatura gerada em todos os casos. Além disso, é importante destacar que essas curvas seguem uma tendência polinomial, o que indica que a relação entre temperatura e velocidade de corte é não linear. Isso sugere a presença de outros fatores além da velocidade de corte que influenciam na geração de calor durante o processo de usinagem, como por exemplo a mudança das propriedades físicas do material em diferentes temperaturas.

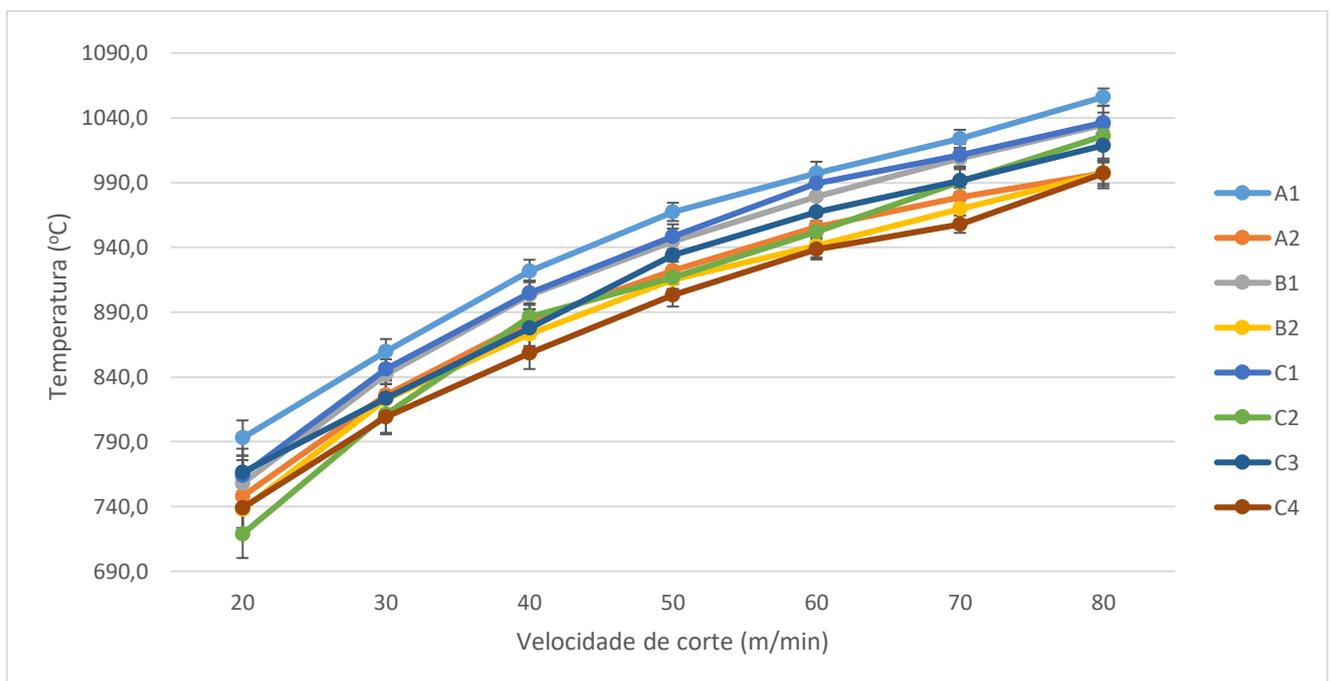


Figura 25 - Curvas temperatura em função da velocidade corte para todas as ferramentas.

Para analisar o impacto da velocidade de corte na temperatura, realizou-se o cálculo das diferenças de temperatura entre várias faixas de velocidade de corte para todas as ferramentas utilizadas. Essas faixas foram estabelecidas em intervalos de 10 m/min, abrangendo desde 20 m/min até a faixa de 70 a 80 m/min. Dessa forma, foi possível avaliar o efeito de cada faixa de velocidade na temperatura de usinagem, e os resultados correspondentes estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Diferença de temperatura por faixas de velocidade de corte.

| Faixa de velocidade de corte (m/min) | A1 (°C) | A2 (°C) | B1 (°C) | B2 (°C) | C1 (°C) | C2 (°C) | C3 (°C) | C4 (°C) | Diferença média da faixa |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------|
| 20 – 30 | 66,6 | 78,0 | 84,0 | 84,9 | 81,8 | 92,4 | 57,2 | 70,3 | 10,24% |
| 30 – 40 | 62,4 | 57,3 | 61,4 | 50,8 | 59,1 | 75,2 | 54,2 | 49,0 | 7,07% |
| 40 – 50 | 45,6 | 38,9 | 41,6 | 41,8 | 43,3 | 30,3 | 56,3 | 44,8 | 4,59% |
| 50 – 60 | 29,8 | 33,7 | 34,2 | 26,2 | 41,2 | 35,6 | 33,4 | 35,6 | 3,62% |
| 60 – 70 | 26,7 | 23,0 | 29,7 | 28,5 | 21,8 | 38,4 | 24,1 | 19,3 | 2,74% |
| 70 – 80 | 32,2 | 18,5 | 26,0 | 27,4 | 25,1 | 35,6 | 27,3 | 39,2 | 2,92% |

Com base na Tabela 7, observa-se que a diferença de temperatura média diminui à medida que as faixas de velocidade aumentam. Isso indica que a influência da velocidade de corte na temperatura da interface cavaco-ferramenta vai diminuindo progressivamente.

É importante destacar que a última faixa analisada, compreendendo a velocidade de corte de 70 a 80 m/min, apresenta valores de temperatura extrapolados, conforme mencionado anteriormente, portanto esses valores podem não corresponder a realidade.

Com o objetivo de avaliar a influência estatística realizou-se uma análise de variância (ANOVA). As velocidades de corte utilizadas foram 40 m/min e 60 m/min.

A análise de variância realizada foi de fator único, adotando um nível de confiança de 95% e um nível de significância de 5%. Se o valor-p for menor que 0,05, o fator demonstra influência, enquanto se o valor-p for maior que 0,05, não foi constatada influência.

A tabela 8 apresenta a tabela ANOVA para a velocidade de corte para 40 m/min e 60 m/min, utilizando todas as ferramentas de corte. É possível ver que como o valor-p é menor do que 0,05 fica claro a influência da velocidade de corte na temperatura interface cavaco-ferramenta.

Tabela 8 - Efeito da velocidade de corte sobre a temperatura de usinagem

| <i>Velocidade de corte</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Entre grupos | 23409 | 1 | 23409 | 51,55559 | 4,71E-06 | 4,60011 |
| Dentro dos grupos | 6356,75 | 14 | 454,0536 | | | |
| Total | 29765,75 | 15 | | | | |

4.4 Temperatura variando ângulo de saída da ferramenta de corte.

Com o objetivo de investigar o impacto do ângulo de saída (γ_o) na temperatura de usinagem, foram realizadas análises comparativas entre as ferramentas que compartilham a mesma letra. Essa abordagem permitiu avaliar os resultados com variação exclusiva do ângulo de saída (γ_o), uma vez que, nessas ferramentas com letras idênticas, o ângulo de folga (α_o) permanece constante. Os ensaios foram conduzidos mantendo-se uma profundidade de corte (a_p) de 0,5 mm e um avanço (f) de 0,1 mm/volta.

Na figura 26, é apresentada uma comparação entre as ferramentas A1 e A2, sendo evidenciado que o ângulo de saída (γ_o) para A1 foi de 0°, enquanto para A2 foi de 5°. A figura 27 ilustra uma comparação entre as ferramentas B1 e B2, nas quais o ângulo de saída (γ_o) foi de 0° para B1 e de 5° para B2. Por fim, na figura 28, são apresentadas as ferramentas C1, C2, C3 e C4, destacando os respectivos ângulos de saída (γ_o): 0° para C1, 5° para C2, 11,5° para C3 e 16,5° para C4.

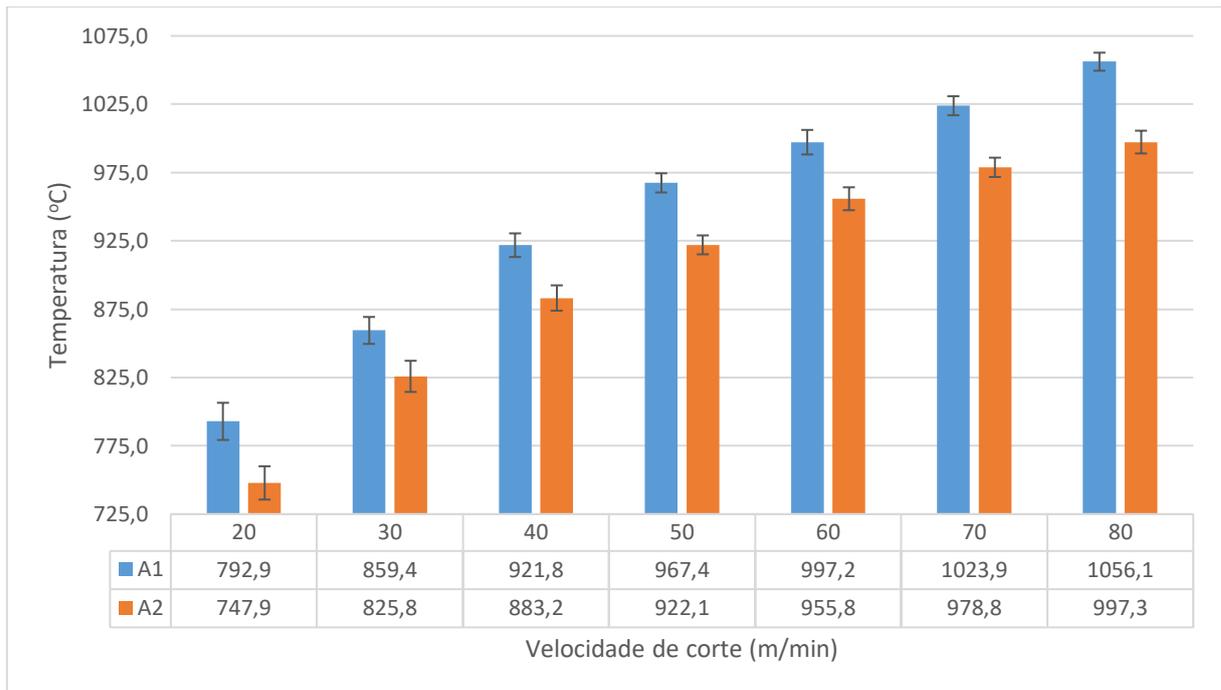


Figura 26 – Temperatura obtida para as ferramentas A1($\gamma_0 = 0^\circ$) e A2 ($\gamma_0 = 5^\circ$).

Com base na figura 4.3, é possível observar que, ao comparar as ferramentas A1 e A2 nas mesmas condições de corte, a temperatura da ferramenta A1 é consistentemente maior do que a da A2 em todos os casos. Portanto, ao aumentar o ângulo de saída, ocorre uma diminuição na temperatura gerada durante o processo de usinagem.

Ao considerar a diminuição da temperatura em todas as condições de corte, observa-se que ao alterar o ângulo de saída de 0° para 5° , ocorreu uma redução média de 4,7% na temperatura de usinagem como se pode ver na Tabela 9.

Tabela 9 - Diferença de temperatura para análise do ângulo de saída das ferramentas A1 e A2.

| Velocidade de corte | 20 m/min | 30 m/min | 40 m/min | 50 m/min | 60 m/min | 70 m/min | 80 m/min | Média |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Diferença °C | 45,0 | 33,6 | 38,7 | 45,3 | 41,4 | 45,1 | 58,8 | 44,0 |
| Diferença percentual | 5,7% | 3,9% | 4,2% | 4,7% | 4,2% | 4,4% | 5,6% | 4,7% |

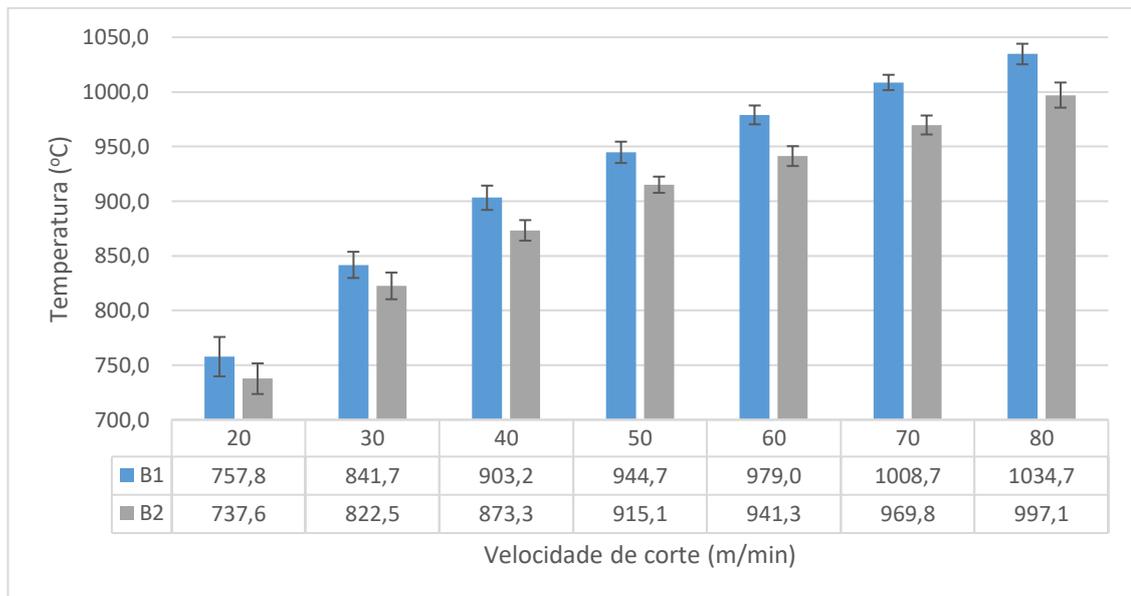


Figura 27 – Temperatura obtida para as ferramentas B1 ($\gamma_o = 0^\circ$) e B2 ($\gamma_o = 5^\circ$).

Ao analisar a figura 27, que compara as ferramentas B1 e B2 nas mesmas condições de corte, pode-se observar que o valor de temperatura da ferramenta B1 é consistentemente superior ao da B2 em todos os casos. Essa observação está alinhada com a ideia de que, ao aumentar o ângulo de saída, ocorre uma diminuição na temperatura gerada durante o processo de usinagem. Portanto, os resultados corroboram a tendência de que um maior ângulo de saída está associado a uma redução da temperatura.

Ao considerar a diminuição da temperatura em todas as condições de corte para as ferramentas B, observa-se que ao alterar o ângulo de saída de 0° para 5° , ocorreu uma redução média de 3,25% na temperatura de usinagem de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10 - Diferença de temperatura para análise do ângulo de saída das ferramentas B1 e B2.

| Velocidade de corte | 20 m/min | 30 m/min | 40 m/min | 50 m/min | 60 m/min | 70 m/min | 80 m/min | Média |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| Diferença °C | 20,2 | 19,2 | 29,9 | 29,6 | 37,7 | 38,9 | 37,6 | 30,4 |
| Diferença percentual | 2,66% | 2,28% | 3,31% | 3,14% | 3,85% | 3,86% | 3,63% | 3,25% |

De acordo com a figura 28, a análise das ferramentas C1, C2, C3 e C4 também revela uma tendência consistente com as ferramentas anteriores, indicando que um aumento no ângulo de saída está associado a uma diminuição na temperatura gerada durante o processo de usinagem. No entanto, é importante observar que em alguns valores de velocidade de corte, essa tendência pode não ter sido mantida.

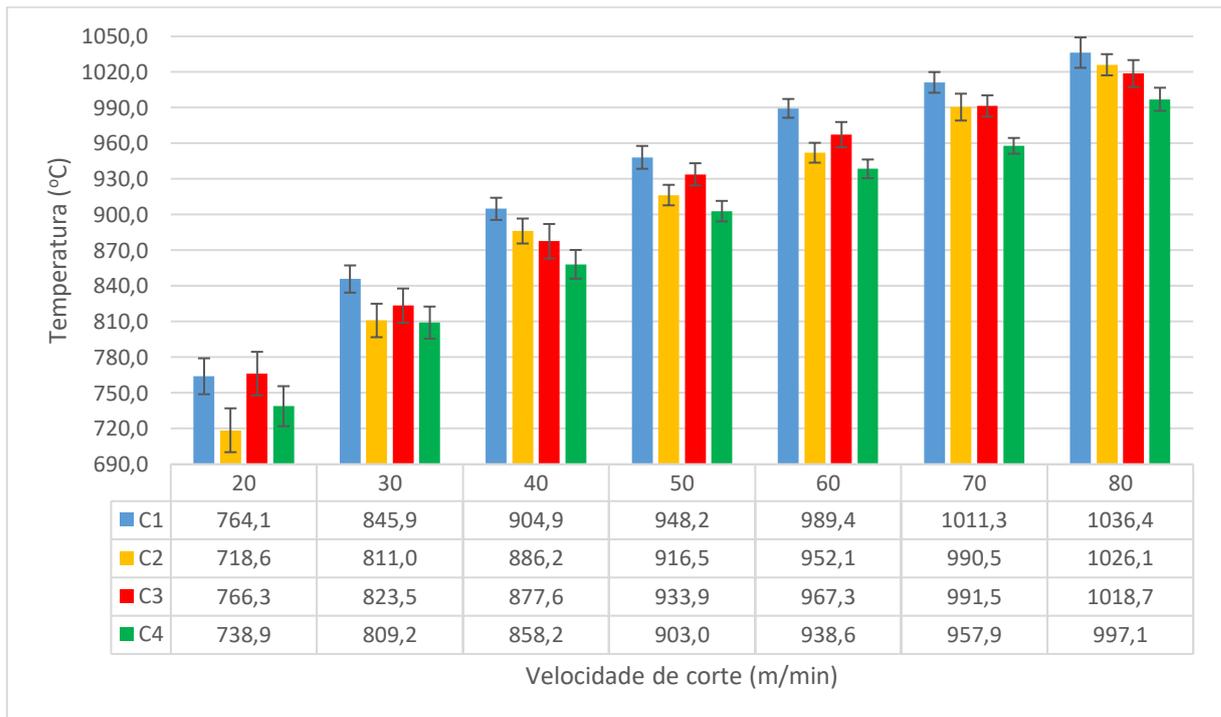


Figura 28 – Temperaturas obtidas para as ferramentas C1 ($\gamma_o = 0^\circ$), C2 ($\gamma_o = 5^\circ$), C3 ($\gamma_o = 11,5^\circ$) e C4 ($\gamma_o = 16,5^\circ$).

No entanto, é importante notar que, ao comparar as ferramentas C1 com C2 e C3 com C4 em todos os casos analisados, observa-se novamente o padrão de aumento do ângulo de saída resultando em uma diminuição na temperatura de corte, corroborando também com a tendência (Figura 29).

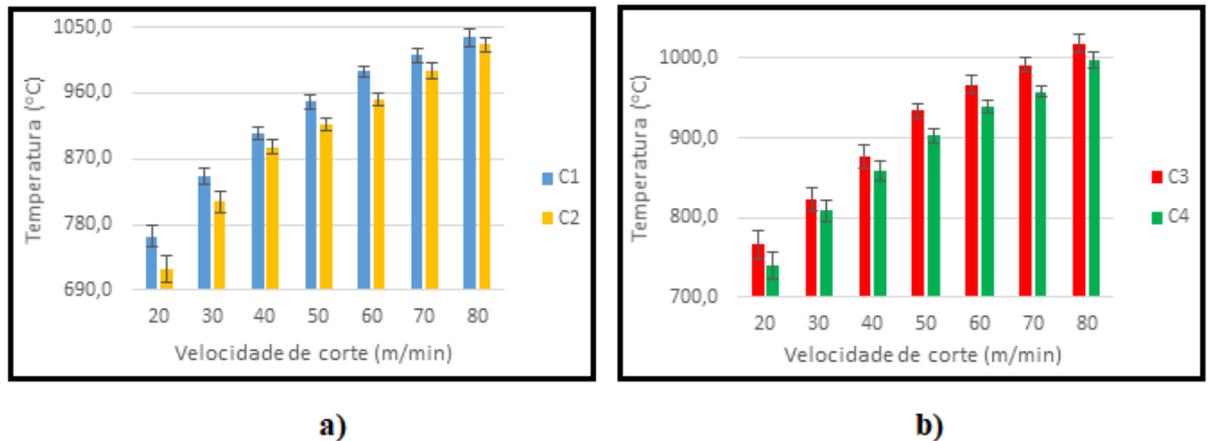


Figura 29 – Comparando as temperaturas obtidas para as ferramentas: a) C1 ($\gamma_o = 0^\circ$) e C2 ($\gamma_o = 5^\circ$), b) C3 ($\gamma_o = 11,5^\circ$) e C4 ($\gamma_o = 16,5^\circ$).

Ao considerar a diminuição da temperatura em todas as condições de corte para as ferramentas C, considerando os valores da tabela 11, os seguintes resultados são observados:

- Ao alterar o ângulo de saída de 0° para 5° (ou seja, de Ferramenta C1 para C2), ocorreu uma redução média de 3,18% na temperatura de usinagem.
- Ao alterar o ângulo de saída de 0° para $11,5^\circ$ (ou seja, de Ferramenta C1 para C3), ocorreu uma redução média de 1,82% na temperatura de usinagem.
- Ao alterar o ângulo de saída de 0° para $16,5^\circ$ (ou seja, de Ferramenta C1 para C4), ocorreu uma redução média de 4,54% na temperatura de usinagem.
- Além disso, é relevante destacar que ao alterar o ângulo de saída de $11,5^\circ$ para $16,5^\circ$ (ou seja, de Ferramenta C3 para C4), ocorreu uma redução média de 2,76% na temperatura de usinagem.

Tabela 11 - Diferença de temperatura para análise do ângulo de saída das ferramentas C1, C2, C3 e C4.

| Velocidade de corte | 20 m/min | 30 m/min | 40 m/min | 50 m/min | 60 m/min | 70 m/min | 80 m/min | Média m/min |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| Diferença C1 para C2 | 45,4 | 34,8 | 18,7 | 31,7 | 37,3 | 20,8 | 10,2 | 28,4 |
| Diferença percentual C1 para C2 | 5,94% | 4,12% | 2,06% | 3,35% | 3,77% | 2,06% | 0,99% | 3,18% |
| Diferença C1 para C3 | -2,2 | 22,4 | 27,3 | 14,3 | 22,1 | 19,8 | 17,6 | 17,3 |
| Diferença percentual C1 para C3 | -0,29% | 2,64% | 3,01% | 1,51% | 2,23% | 1,96% | 1,70% | 1,82% |
| Diferença C1 para C4 | 25,2 | 36,7 | 46,7 | 45,3 | 50,9 | 53,4 | 39,3 | 42,5 |
| Diferença percentual C1 para C4 | 3,30% | 4,33% | 5,16% | 4,77% | 5,14% | 5,28% | 3,79% | 4,54% |
| Diferença C3 para C4 | 27,4 | 14,3 | 19,4 | 31,0 | 28,8 | 33,6 | 21,7 | 25,2 |
| Diferença percentual C3 para C4 | 3,58% | 1,74% | 2,21% | 3,31% | 2,97% | 3,39% | 2,13% | 2,76% |

Os resultados que divergiram do padrão apresentado na maioria dos testes podem ser explicados por alguns fatores. Segundo Stephenson (1993), Kaminise (2014) e Abukhshim *et al.* (2006) citados por Guimarães (2022), a temperatura medida pelo método termopar ferramenta-peça pode estar relacionada à temperatura média na interface entre a ferramenta e a peça. Nesse sentido, altas temperaturas locais que ocorrem por curtos períodos podem não ser observadas. Considerando essa limitação, torna-se difícil determinar com certeza qual das ferramentas, C2 ou C3, obteve a maior temperatura na interface cavaco-ferramenta, pois os valores de temperatura obtidos por essas ferramentas são muito próximos entre si.

Além disso, outros fatores que poderiam influenciar nos resultados são as dificuldades em garantir que todos os parâmetros de corte permaneçam inalterados. Por exemplo, o raio de ponta ou algum outro ângulo podem ter sido diferentes de uma ferramenta para outra, devido à complexidade de amolar a ferramenta sem alterar outras geometrias relacionadas.

De maneira geral, a grande maioria dos resultados obtidos nos experimentos indicam fortemente a tendência de que o aumento do ângulo de saída da ferramenta de corte resulta em uma redução da temperatura de usinagem, de acordo com Wertheim *et al.* (1994) e Machado *et al.* (2015) isso acontece devido ao fato de que o aumento do ângulo de saída reduz os esforços de corte e também reduz o consumo da potência, conseqüentemente reduzirá a temperatura na interface cavaco-ferramenta.

Além disso, de acordo com o manual de informações técnicas da MITSUBISHI MATERIALS, na seção que aborda a função das características das ferramentas de corte para torneamento, é destacado que os efeitos do ângulo de saída para o torneamento são:

1. Aumentando o ângulo de saída na direção positiva (+), reduz o esforço de corte.
2. Aumentando o ângulo de saída na direção positiva (+), diminui o consumo de potência em 1% aproximadamente.
3. Aumentando o ângulo de saída na direção positiva (+) diminui a resistência da aresta de corte e na direção negativa (-) aumenta o esforço de usinagem.

Com o objetivo de avaliar a influência do ângulo de saída realizou-se também uma análise estatística de variância (ANOVA). A análise de variância realizada foi de fator único, adotando um nível de confiança de 95% e um nível de significância de 5%. Quando os valores de p foram inferiores a 0,05, os fatores demonstraram influência do ângulo de saída, enquanto para valores de p maiores que 0,05, não foi constatada influência do ângulo de saída sobre a interface cavaco-ferramenta.

A seguir é apresentado as tabelas ANOVA análise da influência do efeito do ângulo de saída de 0° e 5° para os pares de ferramentas A1 e A2 (tabela 12); B1 e B2 (tabela 13), e os valores de 0°; 5°; 11,5° e 17,5° (tabela 14) para as ferramentas C1, C2, C3 e C4 para todas as velocidades de corte.

Tabela 12 - Efeito do ângulo de saída sobre a temperatura de usinagem para as ferramentas A1 e A2

| <i>20m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-------------|-------------|-----------------|------------------|
| Entre grupos | 2045,292 | 1 | 2045,29158 | 11353,96038 | 8,81E-05 | 18,51282 |
| Dentro dos grupos | 0,360278 | 2 | 0,180139045 | | | |
| Total | 2045,652 | 3 | | | | |
| <i>30m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 1121,312 | 1 | 1121,312 | 832,9659 | 0,001198 | 18,51282 |
| Dentro dos grupos | 2,692336 | 2 | 1,346168 | | | |
| Total | 1124,005 | 3 | | | | |
| <i>40m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 1524,442 | 1 | 1524,441745 | 282,1499821 | 0,003525 | 18,51282 |
| Dentro dos grupos | 10,8059 | 2 | 5,402948225 | | | |
| Total | 1535,248 | 3 | | | | |
| <i>50m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 1736,106 | 1 | 1736,106 | 177,1262 | 0,005598 | 18,51282 |
| Dentro dos grupos | 19,60304 | 2 | 9,80152 | | | |
| Total | 1755,709 | 3 | | | | |
| <i>60m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 1715,244 | 1 | 1715,24364 | 306,4477484 | 0,003247 | 18,51282 |
| Dentro dos grupos | 11,19436 | 2 | 5,59718141 | | | |
| Total | 1726,438 | 3 | | | | |

| <i>70m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------------|------------------|
| Entre grupos | 2020,116 | 1 | 2020,116 | 1057,887 | 0,000944 | 18,51282 |
| Dentro dos grupos | 3,819151 | 2 | 1,909575 | | | |
| Total | 2023,935 | 3 | | | | |
| <i>80m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 3444,293 | 1 | 3444,293 | 2665,458 | 0,000375 | 18,51282 |
| Dentro dos grupos | 2,584391 | 2 | 1,292195 | | | |
| Total | 3446,877 | 3 | | | | |

Tabela 13 - Efeito do ângulo de saída sobre a temperatura de usinagem para as ferramentas B1 e B2

| <i>20m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-------------|-------------|----------------|------------------|
| Entre grupos | 395,1339 | 1 | 395,1339336 | 25,90433367 | 0,036503 | 18,51282 |
| Dentro dos grupos | 30,50717 | 2 | 15,25358415 | | | |
| Total | 425,6411 | 3 | | | | |
| <i>30m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 368,7402 | 1 | 368,7402 | 24,23074 | 0,038879 | 18,51282 |
| Dentro dos grupos | 30,43574 | 2 | 15,21787 | | | |
| Total | 399,176 | 3 | | | | |
| <i>40m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 1007,177 | 1 | 1007,177 | 1667,342 | 0,000599 | 18,51282 |
| Dentro dos grupos | 1,208123 | 2 | 0,604061 | | | |
| Total | 1008,385 | 3 | | | | |
| <i>50m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 881,6541 | 1 | 881,6540918 | 335,7931183 | 0,002965 | 18,51282 |
| Dentro dos grupos | 5,251174 | 2 | 2,625587136 | | | |
| Total | 886,9053 | 3 | | | | |
| <i>60m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 1427,099 | 1 | 1427,099 | 709,2787 | 0,001407 | 18,51282 |
| Dentro dos grupos | 4,024086 | 2 | 2,012043 | | | |
| Total | 1431,123 | 3 | | | | |
| <i>70m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 1516,212 | 1 | 1516,212 | 442,1 | 0,002254 | 18,51282 |
| Dentro dos grupos | 6,859138 | 2 | 3,429569 | | | |
| Total | 1523,072 | 3 | | | | |

| <i>80m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-------------|-------------|----------------|------------------|
| Entre grupos | 1481,754 | 1 | 1481,754133 | 4455,130065 | 0,000224 | 18,51282 |
| Dentro dos grupos | 0,66519 | 2 | 0,332595033 | | | |
| Total | 1482,419 | 3 | | | | |

Tabela 14 - Efeito do ângulo de saída sobre a temperatura de usinagem para as ferramentas C1, C2, C3 e C4.

| <i>20m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|----------------|------------------|
| Entre grupos | 3078,178 | 3 | 1026,059 | 106,5868 | 0,000285 | 6,591382 |
| Dentro dos grupos | 38,50605 | 4 | 9,626513 | | | |
| Total | 3116,684 | 7 | | | | |
| <i>30m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 1732,66 | 3 | 577,5532 | 10,32590816 | 0,02356525 | 6,591382 |
| Dentro dos grupos | 223,7298 | 4 | 55,93244 | | | |
| Total | 1956,389 | 7 | | | | |
| <i>40m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 2272,151 | 3 | 757,3837 | 9,532945 | 0,027048 | 6,591382 |
| Dentro dos grupos | 317,7963 | 4 | 79,44908 | | | |
| Total | 2589,947 | 7 | | | | |
| <i>50m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 2303,006 | 3 | 767,6688 | 53,4562 | 0,001101 | 6,591382 |
| Dentro dos grupos | 57,44283 | 4 | 14,36071 | | | |
| Total | 2360,449 | 7 | | | | |
| <i>60m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 2814,75 | 3 | 938,2501 | 568,5769 | 1,03E-05 | 6,591382 |
| Dentro dos grupos | 6,60069 | 4 | 1,650173 | | | |
| Total | 2821,351 | 7 | | | | |
| <i>70m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 2828,376 | 3 | 942,7921 | 52,24775 | 0,001151 | 6,591382 |
| Dentro dos grupos | 72,17858 | 4 | 18,04464 | | | |
| Total | 2900,555 | 7 | | | | |
| <i>80m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 1677,537 | 3 | 559,1791 | 216,1737 | 7,03E-05 | 6,591382 |
| Dentro dos grupos | 10,34685 | 4 | 2,586712 | | | |
| Total | 1687,884 | 7 | | | | |

Observa-se que, para todos os grupos, o valor de p é menor que 0,05, o que evidencia claramente que o ângulo de saída exerce algum efeito na temperatura da interface cavaco-ferramenta.

4.5 Temperatura variando ângulo de folga da ferramenta de corte.

Com o objetivo de analisar a influência do ângulo de folga (α_o), manteve-se a profundidade de corte (a_p) em 0,5 mm e o avanço (f) em 0,1 mm/volta. Com o intuito de variar apenas o ângulo de folga, foram comparadas ferramentas com o mesmo ângulo de saída (γ_o), dividindo-as em dois grupos: o primeiro com as ferramentas B1, A1 e C1, com ângulo de saída de 0° , e o segundo grupo com as ferramentas B2, A2 e C2, que possuíam um ângulo de saída de 5° . A figura 30 apresenta a comparação das ferramentas B1, A1 e C1, enquanto a figura 31 mostra a comparação das ferramentas B2, A2 e C2.

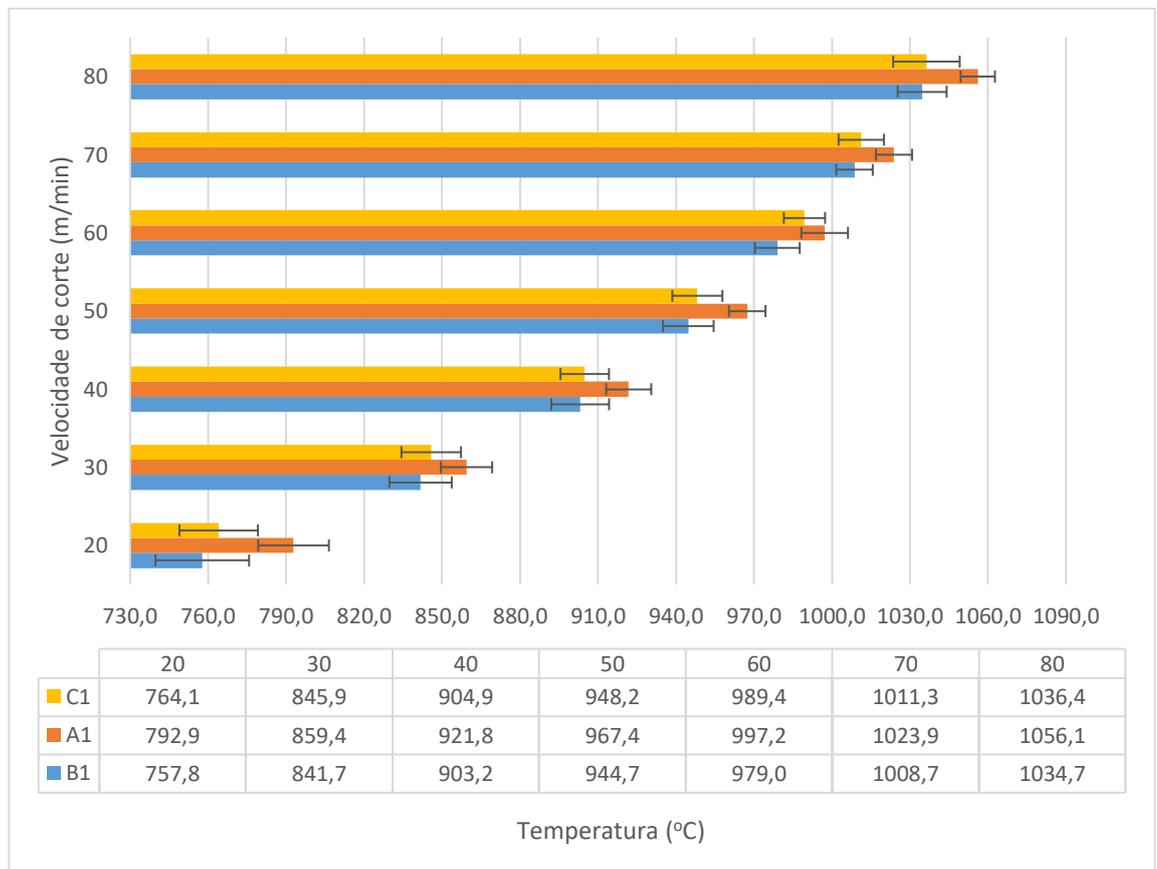


Figura 30 – Temperaturas obtidas para as ferramentas B1 ($\alpha_o = 2^\circ$), A1 ($\alpha_o = 4,5^\circ$) e C1 ($\alpha_o = 7^\circ$).

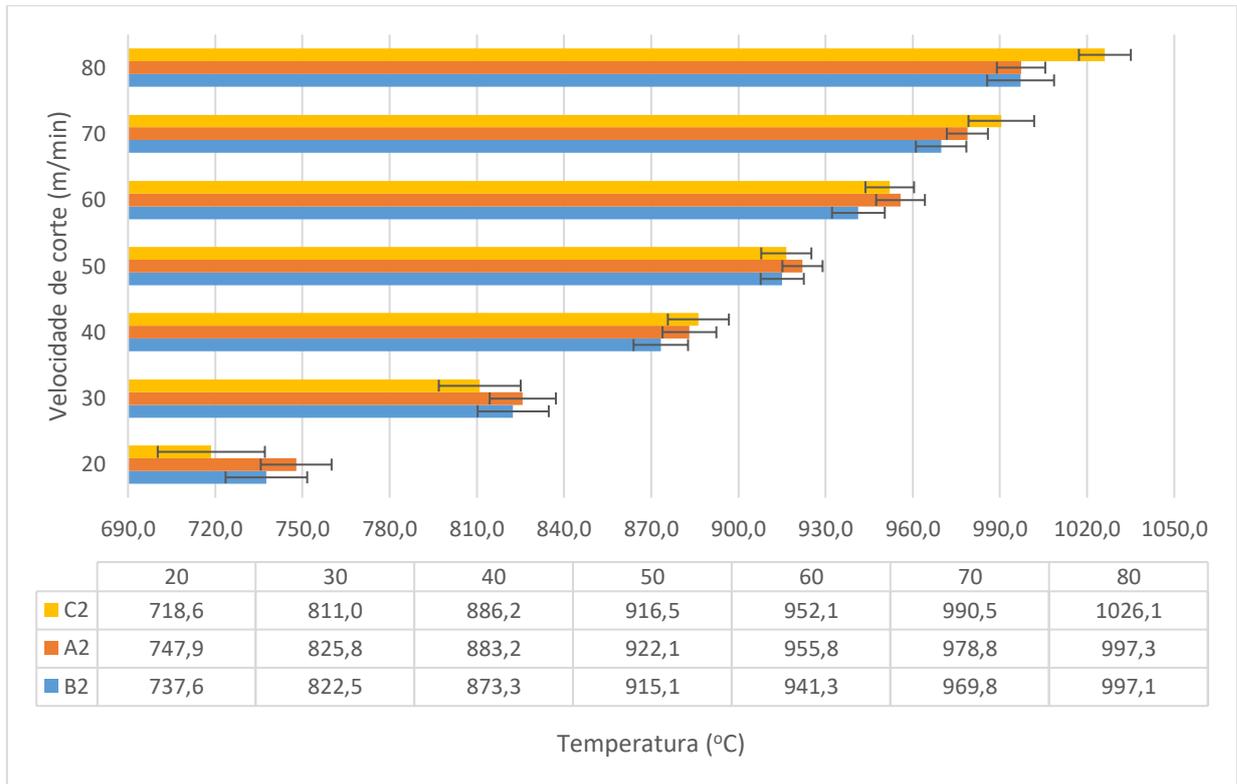


Figura 31 – Temperaturas obtidas para as ferramentas B2 ($\alpha_o = 2^\circ$), A2 ($\alpha_o = 4,5^\circ$) e C2 ($\alpha_o = 7^\circ$).

De acordo com as figuras 30 e 31, é possível observar que a maioria dos valores de temperatura apresenta uma proximidade significativa. Levando em consideração os intervalos de erros, esses valores parecem ser estatisticamente equivalentes tanto para as ferramentas A1, B1 e C1 na figura 30, quanto para as ferramentas A2, B2 e C2 na figura 31.

Com o objetivo de verificar a eficácia do método termopar ferramenta-peça na detecção de possíveis efeitos do ângulo de folga sobre a temperatura na interface cavaco-ferramenta, realizou-se uma análise de variância (ANOVA) de fator único, adotando um nível de confiança de 95% e um nível de significância de 5%. Os resultados dessa análise estão dispostos na Tabela 15 para as ferramentas do grupo A1, B1 e C1, e na Tabela 16 para as do grupo A2, B2 e C2.

Nesta análise ANOVA, caso o valor-p seja superior a 0,05, ficará evidente que não foi possível identificar qualquer efeito do ângulo de folga na interface cavaco-ferramenta. No entanto, se o valor-p for inferior a 0,05, será indicativo de que o ângulo de folga de fato influenciou a temperatura na interface cavaco-ferramenta.

Tabela 15 - Efeito do ângulo de folga sobre a temperatura de usinagem para as ferramentas A1, B1 e C1.

| <i>20m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------------|------------------|
| Entre grupos | 1406,488 | 2 | 703,244 | 141,7642 | 0,001071 | 9,552094 |
| Dentro dos grupos | 14,88198 | 3 | 4,960659 | | | |
| Total | 1421,37 | 5 | | | | |
| <i>30m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 329,7145 | 2 | 164,8573 | 14,63382 | 0,028349 | 9,552094 |
| Dentro dos grupos | 33,79649 | 3 | 11,2655 | | | |
| Total | 363,511 | 5 | | | | |
| <i>40m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 388,6432 | 2 | 194,3216 | 44,92133 | 0,005808 | 9,552094 |
| Dentro dos grupos | 12,97746 | 3 | 4,32582 | | | |
| Total | 401,6206 | 5 | | | | |
| <i>50m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 598,0307 | 2 | 299,0153 | 15,69068 | 0,025775 | 9,552094 |
| Dentro dos grupos | 57,17064 | 3 | 19,05688 | | | |
| Total | 655,2013 | 5 | | | | |
| <i>60m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 339,9264 | 2 | 169,9632 | 33,60175 | 0,008834 | 9,552094 |
| Dentro dos grupos | 15,17449 | 3 | 5,058165 | | | |
| Total | 355,1009 | 5 | | | | |
| <i>70m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 258,3102 | 2 | 129,1551 | 87,63461 | 0,002183 | 9,552094 |
| Dentro dos grupos | 4,421373 | 3 | 1,473791 | | | |
| Total | 262,7316 | 5 | | | | |
| <i>80m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 554,6608 | 2 | 277,3304 | 322,2674 | 0,000315 | 9,552094 |
| Dentro dos grupos | 2,581679 | 3 | 0,86056 | | | |
| Total | 557,2425 | 5 | | | | |

Tabela 16 - Efeito do ângulo de folga sobre a temperatura de usinagem para as ferramentas A2, B2 e C2.

| <i>20m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------------|------------------|
| Entre grupos | 873,1542 | 2 | 436,5771 | 40,70155 | 0,006701 | 9,552094 |
| Dentro dos grupos | 32,17891 | 3 | 10,7263 | | | |
| Total | 905,3331 | 5 | | | | |
| <i>30m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 240,1306 | 2 | 120,0653 | 300,5275 | 0,00035 | 9,552094 |
| Dentro dos grupos | 1,198546 | 3 | 0,399515 | | | |
| Total | 241,3292 | 5 | | | | |
| <i>40m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 176,598 | 2 | 88,29901 | 120,0835 | 0,00137 | 9,552094 |
| Dentro dos grupos | 2,205941 | 3 | 0,735314 | | | |
| Total | 178,804 | 5 | | | | |
| <i>50m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 136,4326 | 2 | 68,21632 | 10,71598 | 0,043027 | 9,552094 |
| Dentro dos grupos | 19,09755 | 3 | 6,365851 | | | |
| Total | 155,5302 | 5 | | | | |
| <i>60m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 233,1723 | 2 | 116,5861 | 99,249 | 0,001817 | 9,552094 |
| Dentro dos grupos | 3,52405 | 3 | 1,174683 | | | |
| Total | 236,6963 | 5 | | | | |
| <i>70m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 436,2727 | 2 | 218,1363 | 63,9938 | 0,003466 | 9,552094 |
| Dentro dos grupos | 10,22613 | 3 | 3,408711 | | | |
| Total | 446,4988 | 5 | | | | |
| <i>80m/min</i> | <i>SQ</i> | <i>gl</i> | <i>MQ</i> | <i>F</i> | <i>valor-P</i> | <i>F crítico</i> |
| Entre grupos | 1152,92 | 2 | 576,4599 | 1611,893 | 2,83E-05 | 9,552094 |
| Dentro dos grupos | 1,072887 | 3 | 0,357629 | | | |
| Total | 1153,993 | 5 | | | | |

É notável que em todos os casos das tabelas 15 e 16 o valor de p é inferior a 0,05, indicando então que o ângulo de folga teve sim algum efeito na temperatura da interface cavaco-ferramenta, porém não foi possível observar a correlação entre o ângulo de folga e a temperatura cavaco-ferramenta.

4.6 Comparação com os resultados obtidos por Cunha (2020)

Foram comparados os resultados obtidos com os resultados previamente apresentados por Cunha (2020). É relevante destacar que todo o trabalho de Cunha (2020) foi realizado no mesmo laboratório, permitindo, portanto, uma comparação e discussão direta entre os dados.

A fim de realizar a comparação das curvas de calibração, é apresentado na figura 32 a curva obtida por Cunha (2020) e a curva obtida no presente trabalho. O ponto de interesse para comparação é a calibração 2 (C2) mostrada na figura 32, pois ela foi obtida de forma semelhante à curva de calibração deste estudo. A equação 4.2 representa a curva de calibração obtida neste trabalho (que já havia sido apresentada no tópico 4.1), já a equação 4.3 é referente a curva de calibração obtida por Cunha (2020).

$$T_u = 2,4798V^3 - 41,437V^2 + 290,78V + 185,8 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (4.2)$$

$$T_c = 59,828V + 34,189 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (4.3)$$

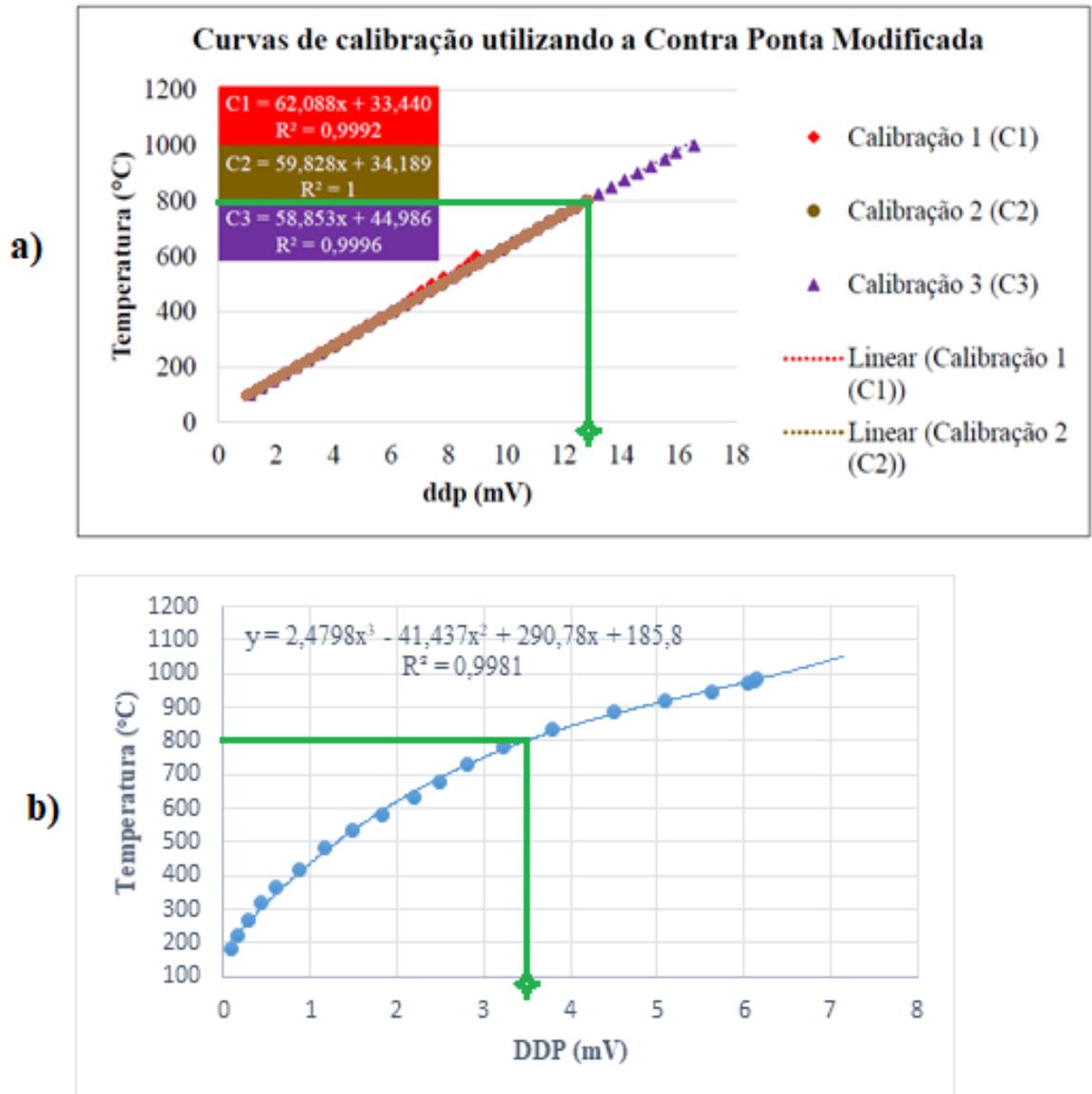


Figura 32 – Comparação entre as curvas de calibração. a) curva de calibração obtida por Cunha (Cunha 2020), b) curva de calibração obtida neste trabalho.

É notável a grande diferença entre essas curvas de calibração. A curva obtida por Cunha (2020) segue uma equação linear (Equação 4.3), enquanto a curva obtida neste trabalho é modelada por um polinômio de grau 3 (Equação 4.2). A fim de compará-las, foram evidenciados nos gráficos da figura 4.9 os pontos em que a temperatura é igual a 800 °C. Observa-se que na curva de Cunha (2020) é necessária uma diferença de potencial (ddp) de aproximadamente 13 mV, enquanto para a curva deste trabalho, a ddp necessária é de cerca de 3,5 mV. Essa discrepância ressalta a importância de obter uma curva de calibração adequada para cada material da ferramenta de corte utilizado no método do termopar ferramenta-peça.

Outra coisa relevante de se observar é nos resultados obtidos. Considerando as mesmas condições de corte, ou seja, profundidade de corte (a_p) fixada em 0,5 mm e o avanço (f) mantido em 0,1 mm/volta e alterando apenas velocidade de corte, variando de 20 a 70 m/min, é apresentado na figura 33 os resultados obtidos por Cunha (2020) e também neste trabalho. A ferramenta utilizada nesta comparação foi A1, afim de que a geometria das ferramentas fossem as mesmas utilizadas por Cunha (2020), ou seja, ângulo de saída $\gamma_0 = 0^\circ$ e Ângulo de folga $\alpha_0 = 5^\circ$.

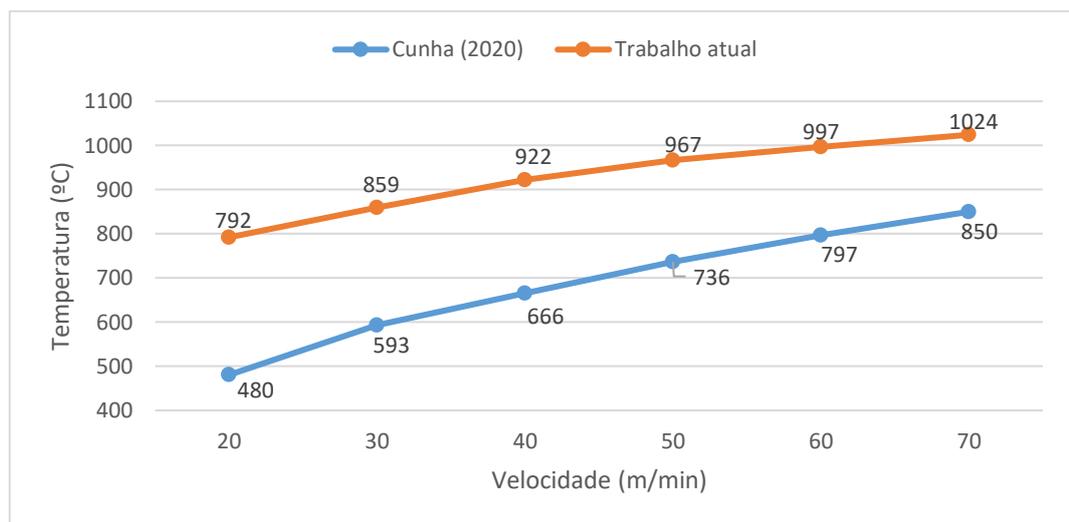


Figura 33 - Comparação da temperatura interface cavaco-ferramenta no trabalho de Cunha (2020) com este Trabalho.

Nota-se que, para os mesmos valores de velocidade de corte, foram obtidos resultados bastante discrepantes de temperatura na interface cavaco-ferramenta. Essa diferença evidencia a disparidade entre as duas barras de metal duro utilizadas nos estudos. Conseqüentemente, fica claro que a escolha do material da ferramenta de corte exerce uma influência significativa na temperatura da interface cavaco-ferramenta.

5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos neste estudo sobre o efeito do ângulo de saída na temperatura obtida pelo método termopar ferramenta-peça no torneamento da liga Ti-6Al-4V, as seguintes conclusões podem ser retiradas deste trabalho.

- Os resultados indicam que o aumento da velocidade de corte corresponde a um aumento na temperatura gerada na interface cavaco-ferramenta. No entanto, observou-se que a diferença de temperatura média diminui à medida que as faixas de velocidade aumentam, sugerindo que a influência da velocidade de corte na temperatura vai diminuindo progressivamente, sendo a faixa onde se tem a maior queda com cerca de 10% de redução e a menor queda cerca de aproximadamente 3%.

- Com relação ao ângulo de saída, os experimentos revelaram consistentemente uma tendência de que o aumento desse ângulo resulta em uma redução da temperatura de usinagem na interface cavaco-ferramenta. Por outro lado, a análise do efeito do ângulo de folga apresentou resultados intrigantes. Embora tenha sido identificado algum impacto do ângulo de folga na temperatura da interface cavaco-ferramenta, não foi possível estabelecer uma correlação conclusiva entre esses dois elementos.

- Foi verificado uma combinação de ângulo de folga e ângulo de saída que gerasse a menor quantidade de calor na interface cavaco ferramenta-peça em todas as faixas de velocidade de corte, sendo essa então uma melhor configuração de parâmetros de corte dentre todos os testes feitos.

- Houve uma notável diferença na comparação das curvas de calibração. Enquanto a curva de Cunha (2020) segue uma equação linear, a curva deste estudo é modelada por um polinômio de grau 3. Para alcançar uma temperatura de 800 °C na curva de Cunha (2020), é necessário um ddp de aproximadamente 13 mV, em contraste com os cerca de 3,5 mV necessários na curva deste estudo. Essa disparidade destaca a importância de obter uma curva de calibração específica para o material da ferramenta de corte utilizado no método do termopar ferramenta-peça.

- Com esses resultados, é possível tomar decisões mais informadas sobre a escolha adequada de ângulos de saída e ângulos de folga, bem como a otimização dos parâmetros de corte. Isso pode levar à melhoria da qualidade das peças usinadas, aumento da vida útil da ferramenta e redução de custos operacionais.

- Portanto, os achados deste estudo têm potencial para impulsionar avanços na área de usinagem de ligas de titânio, contribuindo para aprimorar os processos industriais e promovendo maior eficiência e precisão nas operações de torneamento da liga Ti-6Al-4V. A pesquisa abre caminho para futuras investigações, aprofundando-se em outras variáveis e métodos de medição, com o objetivo de aperfeiçoar ainda mais os processos de usinagem em aplicações práticas e no desenvolvimento de novas tecnologias para a indústria metalúrgica.

- Esta pesquisa abre novas possibilidades para investigações futuras, que podem explorar outras variáveis e métodos de medição. O objetivo é otimizar os processos de usinagem em aplicações práticas e contribuir para o desenvolvimento de novas tecnologias na indústria metalúrgica. Como proposta para futuros trabalhos, seria interessante

- Testar ângulos de saída negativos para avaliar seu impacto na geração de calor durante o processo de usinagem.
- Medir forças de corte nas mesmas condições de corte.
- Fazer simulação em elementos finitos para determinar as temperaturas na interface cavaco ferramenta nas mesmas condições de corte.

6 REFERÊNCIAS

- ABHANG, L. B.; HAMEEDULLAH, M. Chip-Tool Interface Temperature Prediction Model for Turning Process. **International Journal of Engineering Science and Technology**, v. 2, n. 4, p. 382–393, 2010.
[DOI: 10.1.1.189.634](https://doi.org/10.1.1.189.634)
- ABRÃO, A.M., REIS, D.D. The machining of aluminium alloy 6351, Proc. IMechE Vol. 219 Part B: *J. Engineering Manufacture*, 2004
- Abukhshim N.A, Mativenga P.T, Sheikh M.A. Heat generation and temperature prediction in metal cutting : a review and implications for high speed machining. *Int J Mach Tools Manuf* 46:782–800, 2006.
[https:// doi. org/ 10. 1016/j. ijmac htools. 2005. 07. 024](https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2005.07.024)
- ALVELID, B. Cutting Temperature Thermo-Electrical Measurements. **Annals of the CIRP**, v. XVIII, p. 547-554, 1970.
- ANKEM, S.; GREENE, C. A. Recent developments in microstructure/property relationships of beta titanium alloys. **MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING**, v. 263, p.127-131, 1999.
[https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(98\)01170-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(98)01170-8)
- ANTONIALLI, A. I. S. **Uma contribuição ao fresamento frontal da liga de titânio Ti6Al-4V**. 2009. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.
- BARKSDALE, J.; **Titanium its occurrence, chemistry and technology**. 2.ed. New York: Theronald, 1966.
- BYRNE G. Thermolectric signal characteristics and average interfacial temperatures in the machining of metal under geometrically defined conditions. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*; v. 27, n. 2, p. 215-224, 1987.
- BORCHARDT, I. G., GOMES, A. F. **Termometria Termoeétrica – Termopares**. Ed. Sagra S/A, Porto Alegre, 1979.
- Campidelli, Augusto F.V, Lima, Hugo.V, Abrão, Alexandre M, Maia, Antônio A.T. Development of a wireless system for milling temperature monitoring. *Int J Adv Manuf Technol* 104:1551–1560, 2019
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04088-0>
- CASTO, S. L. et al. Cutting Temperatures Evaluation in Ceramic Tools: Experimental experimental tests, numerical analysis and SEM Observations. *Annals of the CIRP*, vol. 43, p. 73-76, 1994.
- CHEN, W.C., TSAO, C.C., LIANG, P.W. Determination of temperature distribution on the rake face of cutting tools using a remote method. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. v. 24, n. 2, p. 161–170, 1997.

[https://doi.org/10.1016/S0735-1933\(97\)00002-X](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(97)00002-X)

CHILDS, T. H. C.; MAEKAWA, K.; OBIKAWA, T.; YAMANE, Y. **Metal Machining: Theory and Applications. 1.** ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, p. 408, 2000.

<https://doi.org/10.1016/C2009-0-23990-0>

COSTA, I.S. **Medição de temperatura de usinagem em aços de corte fácil através do método do termopar ferramenta/peça.** 5 p., POSMEC, 2015, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

CUNHA, Renato Nunes. **Medição experimental de temperatura no torneamento da liga Ti-6Al-4V utilizando o método do termopar ferramenta-peça.** 2020. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.713>.

Da Silva, M.B. e Wallbank, J., 1999. **Cutting temperature: prediction and measurement methods—a review.** *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 88, p. 195–202.

Davim, J. P. **Machining.** London: Springer London, 2008.

DEARNLEY, P. A. New Technique for Determining Temperature Distribution in Cemented Carbide Cutting Tools, *Metals Technology*, vol. 10, p. 205-214, 1983.

Diniz, A.E., Marcondes, F.C., Coppini, N.L., 2003, “**TECNOLOGIA DA USINAGEM DOS MATERIAIS**”, 4. ed., Artliber Editora, São Paulo, 248p.

DONACHIE, M. J. **Titanium - a technical guide.** ASM International: Ohio. 1988.

EZUGWU, E.O., BOONEY, J., YAMANE Y. **An Overview of the Machinability of Aeroengine Alloys.** *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 134, 2003. 233-253p.

Ezugwu, E.O. and Wang, Z.M., 1997, “**Titanium Alloys and their Machinability – a review**”, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 68, pp. 262-274.

FARIAS, A.; BATALHA, G. F.; DELIJAICOV, S. **Avanços na usinagem de ligas de titânio.** In: 6° COBEF, 2011, Caxias do Sul. Anais do 6° Congresso Brasileiro de Fabricação, 2011.

FERNANDES, J. R. S., MACHADO, A. R. **DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DE CONTATO CAVACO/FERRAMENTA NA TEMPERATURA DE CORTE.** Relatório de Iniciação Científica DIRPE nº 052/92.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais.** 11. ed. SÃO PAULO: EDIGARD BLUCHER LTDA, 2003. 751p.

FITZPATRICK, Michael. **Introdução aos processos de usinagem.** 5. ed. São Paulo: AMGH Editora LTDA. 2013.506 p.

Guimarães, B.M. P. **Cutting temperature measurement and prediction in machining processes: comprehensive review and future perspectives.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2022) 120:2849–2878.

<https://doi.org/10.1007/s00170-022-08957-z>

Hopkins C, Hosseini A A review of developments in the fields of the design of smart cutting tools, wear monitoring, and sensor innovation. IFAC-PapersOnLine 52:352–357, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.056>

KALDOR, S.; MALKIN, S. A common denominator for optimal cutting tool geometry. **CIRP Annals**, v. 35, n. 1, p. 41-44, 1986.

[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61834-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61834-4)

Kaminise, A.K., 2012. **Estudo da Influência do Material do Porta-ferramenta sobre as Temperaturas de Usinagem no Torneamento.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Kaminise, A.K., Guimarães, G. & da Silva, M.B. Development of a tool–work thermocouple calibration system with physical compensation to study the influence of tool-holder material on cutting temperature in machining. *Int J Adv Manuf Technol* 73, 735–747 (2014).

<https://doi.org/10.1007/s00170-014-5898-0>

Khan, M.A., Mia, M. & Dhar, N.R. High-pressure coolant on flank and rake surfaces of tool in turning of Ti-6Al-4V: investigations on forces, temperature, and chips. *Int J Adv Manuf Technol* 90, 1977–1991 (2017).

<https://doi.org/10.1007/s00170-016-9511-6>

KITAGAWA, T., KUBO, A., MAEKAWA, K. Temperature and wear of cutting tools in high speed machining of Inconel 718 and Ti-6Al-6V-2Sn. **Wear**, v. 202, p. 142–148, 1997.

[https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07255-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07255-9)

Knoll, P.K. and Schaeffer, L., 2006, “**Análise Microestrutural da Liga de Titânio $\alpha+\beta$, Ti-6Al-4V, Forjada a Quente**”, 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Paraná, Brasil, pp. 7740-7451.

Klocke, F. **Manufacturing Processes 1.** Berlin, Heidelberg, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais.** São Paulo: Blucher, 3ª Edição, 2015, 397p.

MELO, A. C. A. **Estimação da Temperatura de Corte Utilizando Problemas Inversos em Condução de Calor.** 1998, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MANUAL DE INFORMAÇÕES TÉCNICAS. **Função das Características das Ferramentas de Corte para Torneamento.** MITSUBISHI MATERIALS. Disponível em:

http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/.
Acesso em: 25 jul. 2023.

MOODY, N.R.; GARRISON JR., W.M.; SMUGERESKY, J.E.; COSTA, J.E **MICROSTRUCTURE, FRACTURE TOUGHNESS, AND FATIGUE CRACK GROWTH RATE IN TITANIUM ALLOYS**, A.K. CHAKRABARTI AND J.C. Chesnutt, eds., T MS-AIME, Warrendale, PA, 1987.

MOREIRA, M. R. V. *et al.* **Torneamento da liga Ti6Al4V**. O mundo da usinagem, São Paulo, v. 20, n. 4, p.16-19,2004.

Moura, R. R.; Machado, A. R.; Da Silva, M. B., 2015. **The Effect of Application of Cutting Fluid with Solid Lubricant in suspension during cutting of Ti-6Al-4V alloy**. Wear, Vol. 332-333, p. 762-771.

MOURA, R.R. **Usinagem da liga Ti6Al4V com aplicação de lubrificantes sólidos no torneamento**. 2017. 131 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

<http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2017.88>

MOURA, R. R.; MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. **The Effect of Application of Cutting Fluid with Solid Lubricant in suspension during cutting of Ti-6Al-4V alloy**. WEAR, v. 332-333, p. 762-771, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.051>

NICHOLAS, J. V.; WHITE, D. R. **Traceable Temperatures: Na introduction to temperature measurement and calibration**. Ed. John Wiley e Sons, 1994, 654 f.

Oestreich, D. H., Mosquen, A., Stoffel, D. R., Souza, A. J. **REVISÃO DA LITERATURA SOBRE A USINABILIDADE DO TITÂNIO E SUAS LIGAS** CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6., 2011, Caxias do Sul – RS – Brasil.

PETERS, M.; HEMPTENMACHERET J.; KUMPFERT, J.; LEYENS, C. Structure and Properties of Titanium and Titanium Alloys. **TITANIUM AND TITANIUM ALLOYS: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS**, v. 1, p. 1-36, 2003.

<https://doi.org/10.1002/3527602119.ch1>

Pramanik, A. Problems And Solutions In Machining Of Titanium Alloys. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, V. 70, N. 5–8, P. 919–928, 5 Feb. 2014.

REED, R. C. **The Superalloys: Fundamentals and Applications**. Cambridge University Press. p. 372, 2006.

RODRIGUES, A. R. **Estudo da geometria de arestas de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte**. 174 f. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2005.

SANTOS, S. C; SALES, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. 1. ed. São Paulo : Artliber Ltda., 2007.

Santos, M.C., Araújo Filho, J.S., Barrozo, M.A.S. *et al.* Development and application of a temperature measurement device using the tool-workpiece thermocouple method in turning at high cutting speeds. *Int J Adv Manuf Technol* **89**, 2287–2298 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9281-1>

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. Great Britain. Clarendon Press. 2005.

SILVA, F. C. S. **Diagnóstico do processo de torneamento do aço inoxidável ABNT 304 a partir do estudo da formação do cavaco**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. 109p.

Stemmer, C. E., 1995, “**Ferramentas de Corte I**”, 4. ed., Editora da UFSC, Florianópolis, 249p.

Stephenson D.A., Tool-work thermocouple temperature measurements—theory and implementation issues. *J Manuf Sci Eng* 115:432–437, 1993. <https://doi.org/10.1115/12901786>

STEPHENSON, D. A., AGAPIOU, J. S., **Metal Cutting Theory and Practice**, 2nd edition, London, Taylor and Francis Group, 2006, 846p.

TABAK, D. R. S. **Medição de temperatura no torneamento da liga Ti6Al4V utilizando o método termopar ferramenta-peça**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2015. 31p.

TRENT, E. M. **Metal Cutting**. 2. Edition London: Butterworth & Co.,1984.

TRENT, E. M., WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4th edition, Butterworth – Heinemann, USA, 2000. [DOI: 10.2298/SOS0401054U](https://doi.org/10.2298/SOS0401054U)

VENUGOPAL, K.A., PAUL, S., CHATTOPADHYAY, A.B. Growth of tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy undercryogenic cooling. *Wear*, v. 262, n. 9-10, p. 1071-1078, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.11.010>

WERTHEIM, R.; SATRAN, A.; BER, A. Modifications of the edge geometry and chip formation in milling. *CIRP Annals*, v. 43, p. 63-68, 1994. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62165-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62165-9)

WRIGHT, P. K.; TRENT, E. M. Metallographic method of determining temperature gradients in cutting tools. *Journal of the Iron and Steel Institute*, p. 364-368, May. 1973.

YEN, D. W., P. K., WRIGHT. A remote Temperature Sensing Technique for Estimating the Cutting Interface Temperature. *Journal for Engineering for Industry*, v. 108, n. 4, p. 252-263, 1986. <https://doi.org/10.1115/1.3187075>

Zhang, X., Lu, Z., Peng, Z. et al. Development of a tool-workpiece thermocouple system for comparative study of the cutting temperature when high-speed ultrasonic vibration cutting Ti-6Al-4V alloys with and without cutting fluids. *Int J Adv Manuf Technol* 96, 237–246 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1600-2>

