

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CAMPUS JARAGUÁ DO SUL - RAU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA

FELIPE LEONARDO PEREIRA

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA A MEDIÇÃO DA
TEMPERATURA NA FERRAMENTA DURANTE O PROCESSO DE
TORNEAMENTO UTILIZANDO O MÉTODO TERMOPAR FERRAMENTA-PEÇA

JARAGUÁ DO SUL

Junho de 2022

FELIPE LEONARDO PEREIRA

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA A MEDIÇÃO DA
TEMPERATURA NA FERRAMENTA DURANTE O PROCESSO DE
TORNEAMENTO UTILIZANDO O MÉTODO TERMOPAR FERRAMENTA-PEÇA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso Superior de
Tecnologia em Fabricação Mecânica do
Campus Jaraguá do Sul – Rau, do
Instituto Federal de Santa Catarina como
requisito parcial para a obtenção do
diploma de Tecnólogo em Fabricação
Mecânica.

Orientador: Gil Magno Portal Chagas, Dr.

JARAGUÁ DO SUL

Junho de 2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

Pereira, Felipe Leonardo

Desenvolvimento de um dispositivo para a medição
da temperatura na ferramenta durante o processo de torneamento
utilizando o método termopar ferramenta-peça /
Felipe Leonardo Pereira ; orientação de Gil Magno Portal
Portal Chagas. Jaraguá do Sul, SC, 2022.

53 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul -
Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica. .
Inclui Referências.

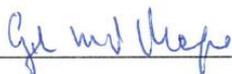
1. Temperatura. 2. Usinagem. 3. Ferramenta. 4. Termopar
ferramenta-peça. I. Chagas, Gil Magno Portal. II.
Instituto Federal de Santa Catarina. . III. Título.

FELIPE LEONARDO PEREIRA

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA A MEDIÇÃO DA
TEMPERATURA NA FERRAMENTA DURANTE O PROCESSO DE
TORNEAMENTO UTILIZANDO O MÉTODO TERMOPAR FERRAMENTA-PEÇA

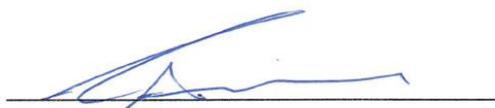
Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em
Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora
abaixo indicada.

Jaraguá do Sul, 21 de junho de 2022.



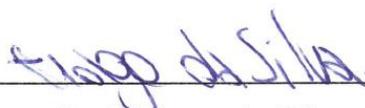
Prof. Gil Magno Portal Chagas, Dr.
Orientador

IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU



Prof. Cassiano Rodrigues Moura, Me.

IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU



Prof. Tiago da Silva, Me.

IFSC – Campus Jaraguá do Sul - RAU

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me proporcionar saúde e força para seguir estudando, trabalhando e superando os momentos de adversidades.

A minha mãe Ana A. Pereira, ao meu filho Victor H. Pereira, a minha noiva Jaqueline Giese e as minhas tias Arailde Américo e Arlete Américo por todo o incentivo, apoio, dedicação e carinho.

Aos meus amigos e familiares que sempre me ajudaram e incentivaram diretamente e indiretamente em todos os momentos.

Em especial ao meu orientador Gil Magno Portal Chagas pelos ensinamentos, confiança, dedicação, paciência, amizade e motivação para a realização deste trabalho.

Ao professor Giovani Conrado Carlini pelos ensinamentos, paciência, dedicação e ajuda em confeccionar e resolver os diversos problemas que tivemos para desenvolver e fabricar os componentes utilizados no trabalho.

Ao técnico de laboratório Gustavo por contribuir e manusear os aparelhos de aquisição dos dados.

Ao IFSC por ceder alguns materiais, ferramentas, equipamentos e o laboratório de usinagem para que todo o trabalho fosse realizado.

RESUMO

Na usinagem, o material é removido pela penetração da ferramenta de corte na peça, esse atrito entre ferramenta-peça resulta na geração de calor e aumento da temperatura. A temperatura na usinagem é um parâmetro importante pois está ligado a vida útil da ferramenta e pode ocasionar problemas geométricos e dimensionais nas peças usinadas. Existem várias formas de se aferir a temperatura na ferramenta, mas a medição na região da interface ferramenta e cavaco é de difícil acesso, tornando inviável a utilização de muitos destes métodos de medição. O objetivo deste trabalho é investigar experimentalmente a temperatura alcançada na interface ferramenta e cavaco em um inserto de metal duro revestido. Desta forma, foi desenvolvido um dispositivo tipo termopar ferramenta peça, que utiliza como princípio o efeito *Seebeck*. O dispositivo desenvolvido foi testado e calibrado para trabalhar com um aço ABNT 4140. Os resultados demonstraram que o dispositivo é capaz de realizar as medições de temperatura de forma eficiente, mostrando a influência da velocidade de corte e profundidade de corte na temperatura de usinagem no corte a seco.

Palavras-Chave: temperatura, usinagem, ferramenta, termopar ferramenta-peça.

ABSTRACT

In machining, the material is removed due to the penetration of the cutting tool in the part, this friction between tool and part results in the generation of heat. Machining temperature is an important parameter as it is linked to tool life and can cause geometric and dimensional problems in machined parts. There are several ways to acquire the tool temperature, but the measurement in the tool-chip interface region is difficult to access, making the use of many of these measurement methods impracticable. The objective of this work is to experimentally investigate the temperature reached at the tool-chip interface in a coated carbide insert. In this way, a tool piece thermocouple device was developed, which uses the *Seebeck* effect as a principle. The developed device was tested and calibrated to work with an ABNT 4140 steel. The results showed that the device is capable to measure the temperature efficiently, showing the influence of cutting speed and cutting depth on the machining temperature in the cut.

Keywords: temperature, machining, tool, tool-part thermocouple.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Principais operações realizadas no torno.	18
Figura 2 - Representação do mecanismo de formação de cavaco.	19
Figura 3 - Zonas de geração de calor.....	21
Figura 4 - Representação das regiões de geração e dissipação de calor no processo de usinagem.....	22
Figura 5 - Métodos de medição de temperatura na Usinagem.....	24
Figura 6 - Circuito básico do termopar.	28
Figura 7 - Esquema básico do circuito termoelétrico do sistema termopar ferramenta-peça.	28
Figura 8 - (a) Simplificação do circuito termoelétrico no método termopar ferramenta-peça; (b) Esquemático simplificado do circuito contendo os elementos e termojunções.....	32
Figura 9 - Esquemático do circuito elétrico do sistema termopar ferramenta-peça com compensação.	33
Figura 10 - Representação do Esquema dos elementos formadores do circuito elétrico do sistema termopar ferramenta-peça.	35
Figura 11- (a) Dimensões da flange de polipropileno; (b) Flange posicionada na castanha do torno.....	38
Figura 12 - Elemento intermediário fixado ao corpo de prova.	38
Figura 13 - (a) Peça (copo) de cobre e elemento intermediário; (b) Peça acoplada no elemento intermediário.	39
Figura 14 - Elemento de compensação física posicionado no porta ferramenta.	40
Figura 15 – Imagem em corte da contra-ponta desenvolvida.....	40
Figura 16 - (a) Inserção do mercúrio (Mg) no reservatório da contraponta; (b) Verificação da condutividade entre a contra-ponta e o parafuso de cobre.....	41
Figura 17 - (a) Porta-ferramenta e ferramenta; (b) Ferramenta e o porta ferramenta com a isolação montada e o elemento de compensação.....	42
Figura 18 - Aquecimento do elemento de compensação para realizar a calibração do sistema ferramenta-peça.....	42
Figura 19 - (a) Posições dos termopares; (b) Inserto em contato apenas com o elemento de compensação.	43
Figura 20 - Fluxograma das atividades para realização do trabalho.	44

Figura 21 – Esquema de calibração do sistema ferramenta-peça.	45
Figura 22 - Bancada montada para realização da calibração do sistema.	45
Figura 23 - Curva de calibração para altas temperaturas.	48
Figura 24 - Corpo de prova após a realização dos ensaios de usinagem.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química do aço ABNT 4140.....	37
Tabela 2- Parâmetros de usinagem.	47
Tabela 3 - Resultado dos ensaios de usinagem.	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina
f.e.m. – Força eletro motriz
ASTM – American Society for Testing and Material

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Objetivos.....	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	O processo de usinagem.....	17
2.1.1	Usinagem por torneamento	17
2.1.2	Formação do cavaco	18
2.2	Temperatura no processo de usinagem.....	20
2.2.1	Calor gerado na zona de cisalhamento primário	22
2.2.2	Calor gerado na zona de cisalhamento secundaria.....	23
2.2.3	Calor gerado na zona de cisalhamento terciaria, ou zona de interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta	23
2.3	Métodos de medição de temperatura na usinagem.....	24
2.3.1	Medição direta por termopares inseridos na ferramenta	25
2.3.2	Temperatura de corte através de vernizes térmicos	25
2.3.3	Medição por radiação de calor com sensores infravermelhos.....	25
2.3.4	Medição por propriedade metalográficas.....	26
2.3.5	Medição utilizando pós químicos	26
2.3.6	Medição utilizando método do filme PVD	27
2.3.7	Método termopar ferramenta-peça	27
2.4	Conceitos utilizados na elaboração do método termopar ferramenta-peça..	30
2.4.1	Compensação física no sistema termopar ferramenta-peça	33
2.4.2	Circuito termopar ferramenta peça para calibração.....	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	Materiais	37
3.1.1	Corpo de prova.....	37
3.1.2	Flange de polipropileno	37
3.1.3	Elemento intermediário.....	38
3.1.4	Elemento de compensação física.....	39
3.1.5	Contra-ponta modificada	40

3.1.6	Ferramenta de corte e porta ferramentas	41
3.1.7	Montagem do sistema de aquecimento	42
3.1.8	Instrumentos e sensores utilizados para aquisição dos dados.....	43
3.2	Metodologia aplicada na calibração do sistema e ensaios	43
3.2.1	Método de calibração do sistema termopar ferramenta-peça.....	44
3.2.2	Bancada experimental	45
3.2.3	Obtenção e análise da curva de calibração	46
3.2.4	Definição dos parâmetros e testes de usinagem	46
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	48
4.1	Análise da curva de calibração.....	48
4.2	Ensaio de medição da temperatura na usinagem.....	49
5	CONCLUSÃO	51

1 INTRODUÇÃO

Com a invenção da máquina a vapor no século XVIII, tornou-se possível construir tornos com dimensões maiores e mais potentes, possibilitando esculpir materiais mais resistentes com uma maior precisão dimensional, o que impulsionou o desenvolvimento do aço. Com a evolução desta tecnologia, junto com a revolução industrial, houve a substituição da mão de obra dos artesãos por máquinas, visando garantir a repetibilidade e reduzir os custos das peças fabricadas. Com o passar dos anos, houve um grande aumento na demanda de produção e consumo, causando efeito na melhoria e desenvolvimento dos processos das máquinas e no sistema de fabricação, que estão em constante evolução (MACHADO et al., 2009).

A usinagem é um dos processos mais utilizado pela indústria da manufatura, devido a sua grande importância no processo de remoção de material, e consiste em transformar a matéria prima em produto, através da remoção de material em formas de cavaco. A usinagem convencional consiste em remover o material por cisalhamento devido a ação de uma ferramenta de corte. Dentre os processos convencionais de usinagem estão o torneamento, fresamento, furação, alargamento, rosqueamento, brochamento, etc. (SANTOS; SALES, 2007). Apesar de ser um dos processos de fabricação mais reconhecidos do mundo, trata-se de um processo simples e complexo ao mesmo tempo. É complexo por conta das dificuldades em determinar imprevisíveis condições de corte. E se tornando simples depois que se determina essas condições.

A usinagem tem a peculiaridade de ser um processo prático, mas que envolve inúmeras variáveis. Shaw (2005) afirma que é praticamente impossível prever o desempenho no corte dos metais. Entretanto, essa condição não significa que os estudos detalhados no processo de usinagem não tenham importância. Cada ponto que é estudado, detalhado e analisado corretamente contribui para o entendimento do processo (MACHADO et al., 2009).

Durante alguns anos, as ferramentas de corte eram feitas de aços comuns de alto carbono, endurecidos e com baixos teores de elementos de liga. Com o passar dos anos foram introduzidas ferramentas de aço-rápido, de carbonetos duros e cerâmicos contendo elementos de liga, conseqüentemente isso torna possível tais ferramentas a operar a temperaturas e velocidades maiores ao que era praticado. Dentre vários parâmetros que influenciam no processo de usinagem, pode-se

considerar a máquina ferramenta, o material a ser utilizado, a ferramenta de corte, fluido de corte e o método de aplicação como os mais importantes.

Durante a usinagem a energia mecânica é convertida em calor através da deformação plástica do cavaco e do atrito entre a peça e a ferramenta. Diante disso é possível relacionar os parâmetros de corte com os efeitos térmicos que a ferramenta de corte sofre, favorecendo o estudo da vida útil da ferramenta e as condições mais severas que a ferramenta pode suportar. A elevação da temperatura da ferramenta reduz a resistência a deformação plástica da ferramenta e cria condições favoráveis para o mecanismo de desgaste, reduzindo a vida útil da ferramenta, limitando assim alguns parâmetros de corte, principalmente o avanço e a velocidade de corte. Devido a estes fatos, pode se afirmar que a temperatura de corte pode ser considerada uma das grandezas mais influentes no processo de usinagem. O que justifica os estudos que avaliam as influências no desempenho da ferramenta de corte (MACHADO et al., 2009).

Entretanto, medir a temperatura de corte não é procedimento fácil, tendo em vista as condições dinâmicas do processo. A interface cavaco ferramenta é praticamente inacessível, tornando o método de medição pouco preciso. Existem atualmente literaturas com diversos modelos físicos, métodos matemáticos e computacionais, usados para calcular a temperatura de usinagem (SANTOS; SALES, 2007).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Realizar um estudo experimental para determinar a temperatura na interface ferramenta-peça no processo de torneamento em uma liga de aço ABNT 4140, utilizando o método do termopar ferramenta-peça, com uma ferramenta de corte intercambiável de metal duro.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver o dispositivo para medição da temperatura pelo método do termopar ferramenta-peça;
- Realizar o processo de calibração do sistema de medição de temperatura pelo método do termopar ferramenta-peça em um aço ABNT 4140;
- Obter e medir a temperatura na interface da ferramenta no processo de torneamento de um aço ABNT 4140.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O processo de usinagem

A Usinagem é compreendida como a remoção de material em forma de cavaco para se obter um produto final. Há muitas formas de executar a usinagem, que pode ser classificada em processo convencional e não convencional.

No processo convencional de usinagem a operação pode ser executada com uma ferramenta de geometria de corte definida ou com uma geometria de corte não definida. São exemplos de processo com ferramenta definida a furação, o fresamento e o torneamento. E exemplos da operação com ferramenta de corte não definida a retificação, o brunimento e o lixamento (MACHADO et al., 2009).

No processo não convencional de usinagem tem-se a remoção do material em um processo eletroquímico, de eletroerosão, a laser, dentre outros (MACHADO et al., 2009).

Tanto no processo convencional de usinagem, quanto no processo não convencional, as operações podem ser executadas em forma de desbaste e acabamento. No desbaste ocorre grande remoção de material, tendo como limite a potência da máquina-ferramenta. No acabamento, o sobre metal que não foi removido pelo desbaste, é removido dando prioridade para a qualidade final do componente (MACHADO et al., 2009).

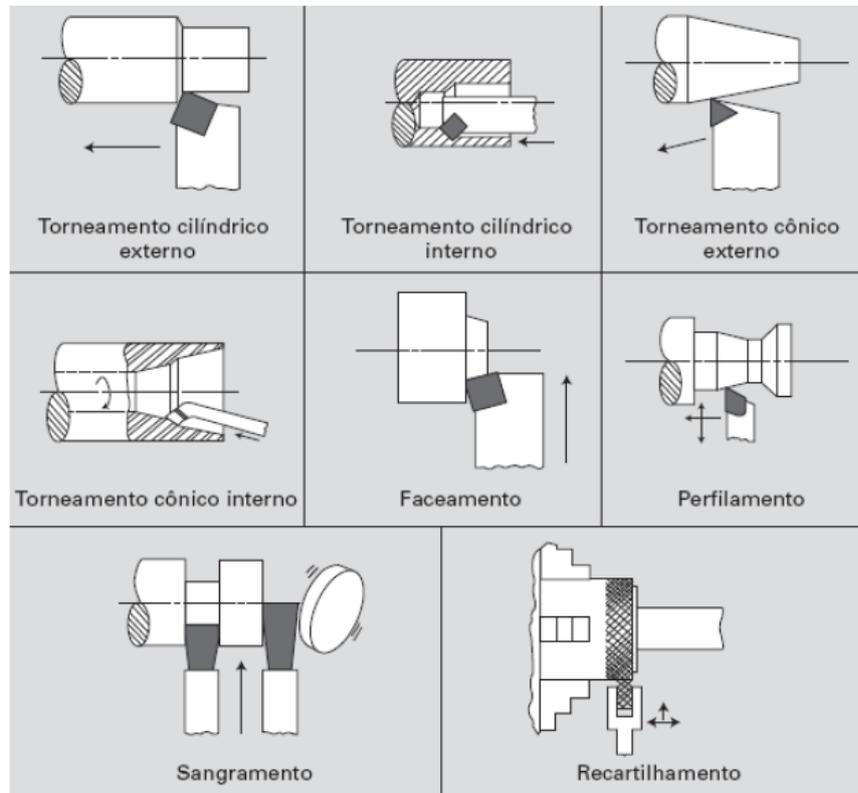
2.1.1 Usinagem por torneamento

Na operação básica de torneamento o material do trabalho é fixado no mandril do torno e gira em torno do seu eixo. A ferramenta de corte é fixada em um porta ferramentas e move-se a uma taxa constante de forma retilínea ou curvilínea. O movimento da ferramenta promove a remoção de uma camada de material (TRENT; WRIGHT, 2000).

Segundo Machado et al. (2009), o processo de usinagem convencional pode ser realizado de diferentes formas conforme pode ser observado na Figura 1. As operações de usinagem citadas na Figura 1 podem ser realizadas em forma de desbaste, onde prioriza maior remoção material, tendo como limitação a potencia máquina-ferramenta. E em forma de acabamento, operação que remove o sobre

metal deixado no desbaste, e tem como prioridade a qualidade final da peça.

Figura 1 - Principais operações realizadas no torno.



Fonte: (MACHADO et. al., 2009)

O princípio adotado em toda máquina-ferramenta para obter o resultado desejado na superfície da peça de trabalho consiste em determinar um movimento relativo apropriado entre a peça e a ferramenta (MACHADO et al., 2009).

2.1.2 Formação do cavaco

O estudo do mecanismo de formação do cavaco é de essencial importância, pois é um processo complexo, devido a elevadas velocidades e alta deformação que ocorre no processo, que são grandes em relação às deformações tratadas na teoria da plasticidade (FERRARESI, 1970).

Geralmente o processo de formação do cavaco em condições normais é dividido em quatro etapas. Recalque inicial do material, deformação e ruptura, deslizamento das lamelas e por fim a saída do cavaco (MACHADO et al., 2009).

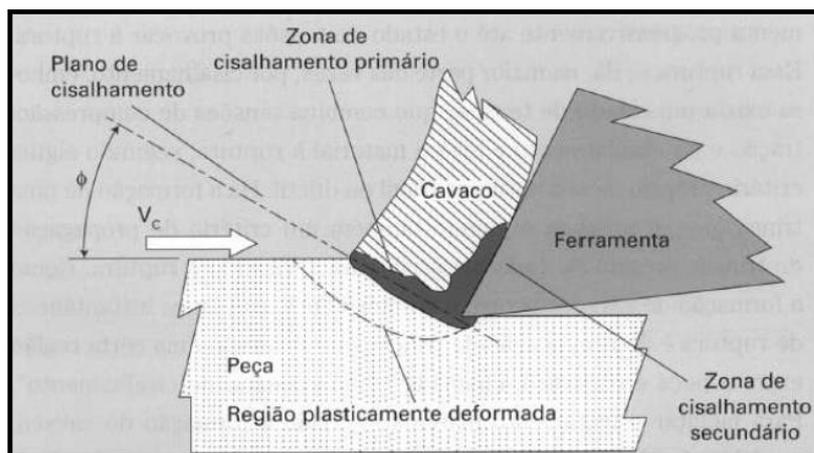
No processo de recalque inicial do material, no momento da penetração da

ferramenta de corte no material da peça, uma porção pequena, ainda solitária e unida a peça, é pressionada contra a superfície de saída da ferramenta de corte.

A deformação e ruptura por ser um processo contínuo, no início do processo o material da peça que é pressionado sofre uma deformação elástica. Em seguida, esse regime plástico segue aumentando progressivamente até formar um estado de tensões no material da peça que provoca a ruptura. Na maioria dos casos, esta ruptura é causada por cisalhamento ou uma combinação de tensões de compressão, tração e de cisalhamento levando o material a ruptura. Seguindo a relação da natureza do material (dúctil ou frágil). Logo após a ruptura surge a formação de uma trinca que se propaga seguindo o critério de acordo com a propriedade de cada material.

Como o processo de formação do cavaco é dinâmico, na região onde ocorre a ruptura do material é chamada de ZONA PRIMÁRIA DE CISALHAMENTO, para facilitar o tratamento matemático dado a formação do cavaco, é usado modelos onde que essa região é considerada apenas um plano de cisalhamento, no qual está concentrado a ruptura. A Figura 2 ilustra o processo de formação de cavaco e a zona de cisalhamento primário, sua direção é relacionado pelo ângulo de cisalhamento ϕ (MACHADO et al., 2009).

Figura 2 - Representação do mecanismo de formação de cavaco.



Fonte: (MACHADO et. al., 2009)

No deslizamento das lamelas, a ferramenta continua penetrando na peça de trabalho, ocasionando uma ruptura parcial ou completa na região da trinca originada no plano de cisalhamento, isso pode variar de acordo com a ductilidade do material

e das condições de usinagem como velocidade de corte e avanço. Estas condições de usinagem irão determinar quanto de material que foi recém rompido permanecerá unido ao cavaco que foi formado.

No processo de saída do cavaco, o movimento relativo da peça contra a ferramenta, dá início a um escorregamento da porção de material que foi deformada e cisalhada (lamela de cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. No momento que esse processo ocorre, uma nova porção de material adjacente à porção anterior está se deformando e cisalhando, que também escorregará sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo o fenômeno novamente.

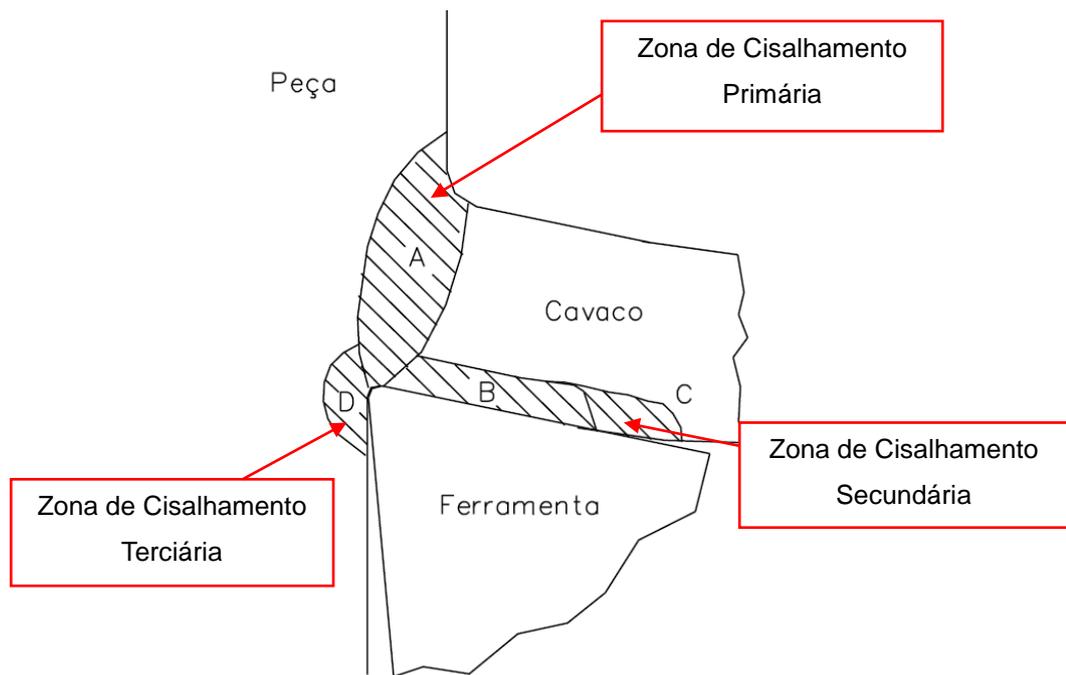
2.2 Temperatura no processo de usinagem

Segundo Trent e Wright (2000), grande parte da potência consumida no processo de usinagem dos metais se converterá em calor na região próxima à aresta de corte. Isto ocorre devido ao calor gerado durante a forte deformação plástica do cavaco, ao atrito entre o cavaco e a ferramenta de corte e do atrito entre a peça e a ferramenta.

Os custos do processo de usinagem dependem da quantidade de metal removido. Podendo variar conforme se aumenta ou reduz a velocidade de corte e o avanço da ferramenta na peça. Entretanto, estes parâmetros têm um limite a ser respeitado, se ultrapassar os limites para essas velocidades a vida útil da ferramenta será drasticamente diminuída, elevando o custo da usinagem (TRENT; WRIGHT, 2000). Por isto, é importante compreender quais os fatores influenciam a geração de calor, o fluxo de calor, como as temperaturas são distribuídas na peça e na ferramenta próximo a aresta de corte (MACHADO et al., 2009).

No processo de formação do cavaco é possível observar três regiões distintas de geração de calor. Zona Primária de cisalhamento (Região A Figura 3); na interface entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta ou Zona Secundária de Cisalhamento (Regiões B e C na Figura 3); e na interface de contato da peça com a superfície de folga da ferramenta ou Zona Terciária de Cisalhamento (Região D Figura 3). Na Zona Primária o calor é causado pelo cisalhamento interno do material, nas Regiões B, C e D o calor é gerado do atrito e do cisalhamento interno provocados pela aderência entre as superfícies.

Figura 3 - Zonas de geração de calor.

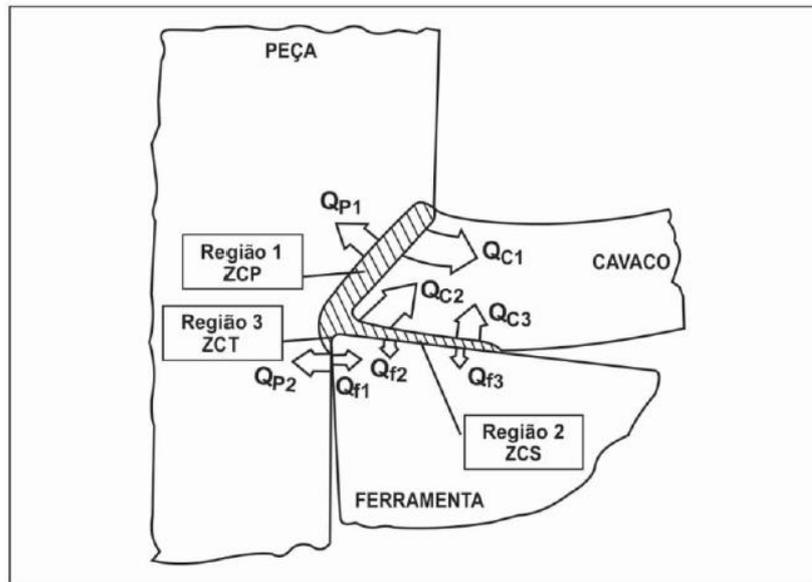


Fonte: Adaptado de (MACHADO et. al., 2009)

No processo de formação do cavaco existem três principais fontes de geração de calor. A deformação plástica do cavaco na região de cisalhamento, o atrito do cavaco com a superfície de saída da ferramenta e o atrito da peça com a superfície de contato da ferramenta (FERRARESI, 1970).

O calor produzido nessas regiões é dissipado através do cavaco, da peça, da ferramenta e do meio ambiente. A Figura 4 mostra uma representação das regiões de geração e distribuição de calor. Segundo Ferraresi (1970), o balanço energético do processo de corte pode ser expresso pela Equação 1. A Equação 1 apresenta que o calor gerado nas zonas de cisalhamento primária, secundária e terciária é igual ao calor dissipado no cavaco, na peça na ferramenta de corte e no meio ambiente.

Figura 4 - Representação das regiões de geração e dissipação de calor no processo de usinagem.



Fonte: Ferraresi (1970)

$$Q = Q_{ZCP} + Q_{ZCS} + Q_{ZCT} = Q_C + Q_P + Q_{ma} + Q_f \quad (1)$$

Onde:

Q_{ZCP} = calor gerado na zona de cisalhamento primária.

Q_{ZCS} = calor gerado na zona de cisalhamento secundária.

Q_{ZCT} = calor gerado na zona de cisalhamento terciária.

Q_C = calor dissipado pelo cavaco, resultado da soma entre Q_{c1} , Q_{c2} e Q_{c3} mostrados na Figura 4.

Q_P = calor dissipado pela peça, resultado da soma entre Q_{p1} e Q_{p2} mostrados na Figura 4.

Q_{ma} = calor dissipado pelo meio ambiente.

Q_f = calor dissipado pela ferramenta de corte, resultado da soma entre Q_{f1} , Q_{f2} e Q_{f3} mostrados na Figura 4.

2.2.1 Calor gerado na zona de cisalhamento primário

A maioria do calor gerado na zona de cisalhamento primária é dissipada através do cavaco e apenas uma pequena fração é transmitida para a peça por condução térmica, aumentando sua temperatura, possibilitando causar problemas de precisão dimensional da peça.

Segundo Trent e Wright (2000), a temperatura do cavaco não sofre grande

influência pela velocidade de corte. O calor do cavaco diminui, conforme a velocidade de corte aumenta, causando um aumento da temperatura devido a menos calor fluir de volta para o material de trabalho.

A Temperatura do cavaco gera pouca influência na temperatura da ferramenta, isto ocorre devido ao curto tempo que o cavaco aquecido fica em contato com a superfície de saída da ferramenta (poucos mili segundos) para transferir o calor.

A temperatura no cavaco pode chegar a 650° C quando usinado aços endurecidos e algumas ligas de níquel, sob certas condições de corte, mas a faixa normal de temperatura do cavaco, quando usinado aços e outros materiais comuns é de 200°C a 350° C.

2.2.2 Calor gerado na zona de cisalhamento secundária

A Zona de Cisalhamento Secundária é a fonte de calor que mais influência na temperatura da ferramenta de corte (SANTOS; SALES, 2007).

A velocidade de corte aumenta a temperatura da interface cavaco-ferramenta. Desta forma, haverá um limite prático na velocidade de corte para cada par Ferramenta-Peça. As altas temperaturas na ferramenta de corte, aceleram o mecanismo de desgaste e reduzem o limite de escoamento da ferramenta (TRENT; WRIGHT, 2000). As temperaturas na interface cavaco-ferramenta podem atingir 1000°C na usinagem de aços, as ferramentas de corte devem estar preparadas para poder suportar essas elevadas temperaturas durante o processo de trabalho (SANTOS; SALES, 2007).

2.2.3 Calor gerado na zona de cisalhamento terciária, ou zona de interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta

No processo de usinagem, caso se trabalhe com ângulos de folga pequenos (1°), ou se o desgaste de flanco atingir valores consideráveis, a região da interface peça-superfície de folga da ferramenta se tornará a terceira fonte de geração de calor. Nesta terceira Zona de geração de calor, a análise pode ser considerada similar a zona de cisalhamento secundária, com a presença da zona de fluxo, que irá promover altas temperaturas na superfície de folga, podendo ocorrer o colapso

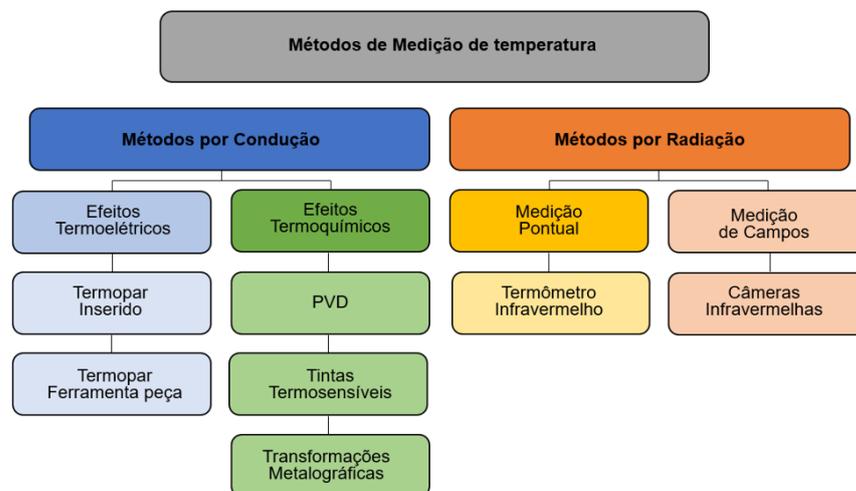
da ferramenta de corte (SANTOS; SALES, 2007).

2.3 Métodos de medição de temperatura na usinagem

Devido à grande demanda de manufatura em otimizar seus processos e ganho de tempo de produção, a temperatura por ser um campo escalar que varia todo o sistema no momento do corte, dificulta a tarefa de conseguir medir as temperaturas no processo de usinagem, mesmo em condições de um corte simples, sendo assim vale ressaltar a importância dos métodos de medição de temperatura. Várias técnicas para medir a temperatura com base em vários princípios físicos foram desenvolvidas. E tem sido um importante objetivo de pesquisa e algumas experiências com métodos exploratórios como: medição direta por termopares inserido, medição utilizando vernizes termo sensíveis, medição por radiação de calor com sensores infravermelhos, medição por propriedades metalográficas, medição utilizando pós químicos e medição usando método do filme PVD e medição da força termoelétrica entre a ferramenta e a peça (método do termopar ferramenta-peça) (MACHADO et al., 2009).

A Figura 5 mostra os diferentes métodos de medição de temperatura possíveis de ser utilizados na usinagem.

Figura 5 - Métodos de medição de temperatura na Usinagem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

2.3.1 Medição direta por termopares inseridos na ferramenta

Os termopares são os sensores mais utilizados pela indústria para medição de temperatura e cobrem uma faixa considerável de temperatura que vai de -200°C a 2300°C . Estes sensores possuem uma boa precisão com um custo relativamente baixo, quando comparado a outros métodos (SILVA, 2018).

A aplicação direta dos termopares na ferramenta permite registrar a variação da temperatura em diferentes pontos. Através do processo de eletroerosão são feitos furos de pequenos diâmetros (0,30 ou 0,40mm), onde serão posicionados os termopares.

Neste procedimento os resultados das medições fornecem uma boa aproximação dos valores de temperatura na interface cavaco-ferramenta e plano de cisalhamento, sobre a superfície de saída. Porém não permite medir a temperatura muito próxima da interface entre a ferramenta e o cavaco (MACHADO et al., 2009).

Kus (2015) fez um ensaio de medição da temperatura na usinagem, através do método termopar inserido na ferramenta, e no mesmo estudo utilizou o método de medição de temperatura através de um sensor infravermelho. A usinagem foi realizada com uma ferramenta WNVG 080404-IC907 em um aço AISI4140. Os ensaios com o método termopar inserido na ferramenta, utilizou um termopar tipo K, posicionado a 1mm da aresta de corte, e obteve resultados de temperatura de 57° até 83°C . Já os ensaios de calor radiado na região de corte, obtidos através do sensor infravermelho, as temperaturas variaram de 390°C até 525°C .

2.3.2 Temperatura de corte através de vernizes térmicos

Nessa técnica a ponta da ferramenta é revestida com um material específico que tem a propriedade de alterar sua cor conforme varia a temperatura. Com esse método é possível controlar a vida útil da ferramenta (STEPHENSON; AGAPIOU, 2016).

2.3.3 Medição por radiação de calor com sensores infravermelhos

O método de medição de temperatura utilizando sensores infravermelhos, ou pirômetros, é muito usado para extrair a temperatura no processo de usinagem

apenas na superfície da peça, do cavaco ou da ferramenta. Apresenta uma grande vantagem por não ser necessário o contato com a superfície que será medida a temperatura, resultando uma medição sem interferências nas temperaturas medidas. Esse método de medição por sensores infravermelhos é mais indicado para se obter a temperatura na ferramenta no processo de fresamento, pela vantagem de não tem contato com a ferramenta que trabalha em rotação. Em contrapartida, a presença de fluidos de corte interfere a emissão dos raios infravermelhos dificultando a avaliação as temperaturas por esse método. Outro ponto importante é que não é possível medir a temperatura na interface ferramenta-peça, devido à dificuldade de acesso nesta região (MACHADO et al., 2009).

Rezende (2020) realizou um estudo com a utilização de um sensor infravermelho junto com um modelo analítico para prever a temperatura na interface ferramenta-peça na usinagem. A autora avaliou a influência do revestimento do inserto na temperatura no torneamento de um ferro fundido vermicular, obtendo como resultados temperaturas que variam de 389°C até 470°C.

2.3.4 Medição por propriedade metalográficas

É realizada inspeção metalográfica da ferramenta após a sua operação de trabalho, os valores de temperatura são estimados através da distribuição de calor na ferramenta de corte. Foram desenvolvidas técnicas, para os materiais usados nas ferramentas de corte, que tem em sua composição materiais ligantes com temperatura específica de transformação de fase. Que sofrem alterações com altas temperaturas no processo de usinagem permitindo determinar as isotérmicas nas ferramentas, podendo ser analisadas através de um corte transversal a aresta principal de corte da ferramenta (MACHADO et al., 2009).

2.3.5 Medição utilizando pós químicos

Este método consiste na utilização de pós químicos (NaCl, KCl, CdCl, PbCl₂, AgCl e KNO₃) com pontos de fusão bem definidos, que irão determinar a distribuição da temperatura na ferramenta de corte. Dois insertos são igualmente divididos ao meio por um processo de retifica. As superfícies retificadas são umedecidas com uma solução para melhorar a adesão do pó químico, que posteriormente será

espalhada por estas superfícies. Em seguida as duas partes são unidas para realizar o processo de usinagem. Após o trabalho realizado o inserto é novamente separado em duas partes, e a isotérmica gerada pela fusão do pó químico e ao que permaneceu sem transformação é que será observada. Este ensaio será repetido com outros tipos de pós químicos que têm pontos de fusão diferentes e com a ferramenta do mesmo material. Só assim será possível determinar a distribuição da temperatura no plano ortogonal na aresta de corte do inserto (MACHADO et al., 2009).

2.3.6 Medição utilizando método do filme PVD

Esta técnica é muito parecida com o processo de pós químicos. O que difere é que este método consiste em depositar finas camadas de filmes de materiais puros, com pontos de fusão específicos, através processo deposição física PVD (Physical Vapor Deposition) na ferramenta. A aferição dos dados com este procedimento é mais complexa com relação ao método anterior, por outro lado, a topografia mais suave que os pós químicos deixa a área de contato entre as metades da ferramenta maior, exercendo menor influência na distribuição de calor (MACHADO et al., 2009).

2.3.7 Método termopar ferramenta-peça

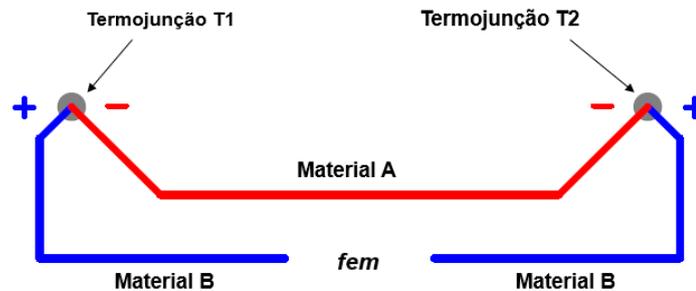
De acordo com Stephenson e Agapiou (2016). Acredita-se que este método foi utilizado pela primeira em 1925 por Gottwein e Shore e permanece em desenvolvimento até os tempos atuais. É um método muito utilizado por estabilizar seu sistema rapidamente, em torno de 10 a 20 segundos (FERRARESI, 1970).

Segundo Santos e Sales (2007), este método é o mais difundido e, embora pareça simples, é muito utilizado devido ao baixo custo e sua alta sensibilidade $\pm 20^{\circ}\text{C}$, o que é pequeno, considerando a alta temperatura de corte na peça e ferramenta.

O método do termopar ferramenta-peça utiliza como base o princípio de funcionamento do termopar, que se dá pelo efeito *Seebeck*, descoberto em 1821 pelo físico Thomas Johann Seebeck. Analisando que metais distintos ao formarem um circuito e com suas junções em temperaturas diferentes, podem produzir uma

força eletromotriz (f.e.m.). A tensão gerada neste circuito dependerá apenas da diferença de temperatura entre as junções e a natureza física dos materiais que compõem o circuito. A Figura 6 representa o circuito básico de um termopar.

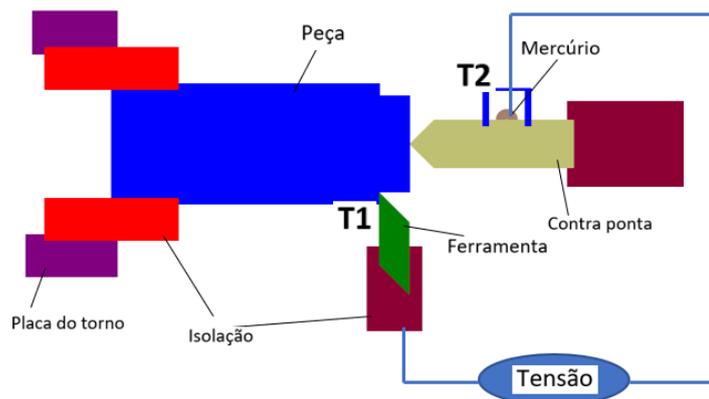
Figura 6 - Circuito básico do termopar.



Fonte: Adaptado de Kaminise (2012).

Com base no efeito *Seebeck* o método utiliza a ferramenta com inserto e a peça de trabalho como par termoelétrico. A junta quente é formada entre a ferramenta e a peça e a junta fria é composta com os pontos mais afastados da ferramenta e da peça, formando um circuito elétrico fechado (STEPHENSON; AGAPIOU, 2016).

Figura 7 - Esquema básico do circuito termoelétrico do sistema termopar ferramenta-peça.



Fonte: Adaptado de Kaminise (2012).

Na representação é possível ver um circuito totalmente fechado onde o ponto entre (T1 e T2) representa a junta quente, os demais pontos representam as juntas frias do sistema, que serão conectados a um Voltímetro para se obter a temperatura.

Apesar de ser um método confiável e bastante utilizado, este método tem algumas limitações, uma delas é que todo o sistema tem que ser condutor elétrico, em outras palavras não permite avaliar um inserto cerâmico e peças não metálicas, por exemplo (STEPHENSON; AGAPIOU, 2016).

O método termopar ferramenta-peça mede a temperatura apenas na interface de corte. Existem vários trabalhos encontrados na literatura utilizando esta técnica, para se obter a temperatura de corte. Segundo Davies et al. (2007) é possível citar o trabalho de Stephenson (1993), que analisou o circuito do método ferramenta-peça e chegou à conclusão que a f.e.m. gerada na interface ferramenta/cavaco representa uma temperatura média da interface, somente se esta temperatura for uniforme. Concluiu também que o isolamento do circuito é muito importante para evitar discrepâncias na captação do sinal que irá fornecer a temperatura.

Trent e Wright (2000) afirmam que neste método existem algumas fontes de erro, um deles é devido ao próprio material e a ferramenta não serem de elementos ideais para um termopar. Trent e Wright (2000) também comentam sobre os erros que podem ocorrer com uma calibração incorreta do termopar.

Naves (2006) realizou um estudo detalhado da calibração de um sistema termopar ferramenta-peça para medição de temperatura na usinagem. Utilizando para o ensaio dois materiais distintos usados para a composição da peça e para o inserto, aquecidos em um forno por indução a 1100°C. Resultando em uma curva de calibração do termopar muito eficaz.

Kaminise (2012), utilizou o método Termopar ferramenta-peça no seu estudo de influência do material utilizado no porta-ferramentas, e explicou com mais detalhes o processo de calibração do sistema e sua importância para realização do experimento. O autor, antes do processo de calibração, realizou um teste laboratorial com um sistema de compensação física, visando diminuir os efeitos prejudiciais da junção formada entre a ferramenta e o fio condutor. Foi feito um estudo formando um circuito com fios contemplando todos os materiais que estão presentes no processo de usinagem. Por exemplo, usando materiais distintos para os fios que representam a contra ponta, o inserto e a peça. Com os resultados, foi possível elaborar uma proposta de calibração utilizando o próprio aparato utilizado no processo experimental. O Autor também realizou ensaios de usinagem, e por se tratar de um ensaio com porta-ferramentas de materiais distintos, o resultado foi uma média da temperatura que atingiram entre 725°C e 750°C.

Silva (2018), obteve a curva de um sistema de medição da temperatura de corte pelo método termopar ferramenta-peça na usinagem de material ABNT D6. Este autor realizou o processo de calibração dos termopares diretamente no aparato usado no processo de usinagem com uma chama de um maçarico oxiacetileno e obteve resultados satisfatórios

Lima Junior (2020) investigou a temperatura de corte no torneamento do aço AISI D6, com refrigeração de nitrogênio líquido. Neste experimento o autor utilizou ensaios a seco e com refrigeração no processo de usinagem e captação dos dados. Desse modo, foi necessário criar um processo de calibração para temperaturas negativas, o que não foi visto por outros autores. Este autor também desenvolveu um sistema de captação de dados utilizando o Arduino Uno. O autor obteve como resultado nos ensaios a seco a temperatura mínima de 832°C e máxima de 1252°C. Já nos ensaios com refrigeração a temperatura mínima foi de 745°C e máxima de 1208°C.

Considerando que o método termopar ferramenta peça tem mostrado bons resultados na medição de temperatura na usinagem, segundo diversos autores citados, este método será utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

2.4 Conceitos utilizados na elaboração do método termopar ferramenta-peça

Apesar do método termopar ferramenta-peça ser considerado simples, é necessária uma explanação mais detalhada deste conceito para o correto uso do método no experimento e para a calibração do sistema.

O processo, fundamentado pelo efeito *Seebeck*, mostra que em um circuito fechado formado por dois materiais condutores distintos A e B fechando um circuito elétrico e cada junção destes materiais (junção T_1 e junção T_2) em temperaturas diferentes, causa a circulação de corrente elétrica no circuito e gera uma Força eletromotriz (ΔE), conforme pode ser apresentado na Figura 6. A existência da f.e.m. ocorre devido a diferença da densidade de elétrons livres dos dois metais condutores em temperaturas diferentes.

Como uma corrente elétrica circula o circuito, ela pode ser detectada por um Voltímetro conectado. Sendo assim, se a corrente atravessa o circuito, é gerada uma potência elétrica e calor é liberado para o meio e é estabelecida uma conversão de energia elétrica para térmica (NAVES, 2006).

A soma das tensões ΔE geradas nas junções termoelétricas do circuito é a tensão total do circuito. Sendo assim, conforme a Equação 2 é possível considerar cada junção como uma fonte de tensão e o somatório destas tensões será a tensão total do Circuito ΔE .

$$\Delta E = E_a + E_b \quad (2)$$

A intensidade das tensões E_a e E_b geradas em cada termojunção dependem da temperatura e do coeficiente de Seebeck (σ), conforme a Equação 3. O coeficiente de Seebeck σ , refere-se a taxa de variação de tensão com a temperatura e é dependente dos materiais que irão formar o termopar. Esta relação com a taxa de variação de tensão com a temperatura é quase sempre fixa, resultando em uma função linear na maioria dos casos.

$$\Delta E = \sigma_{AB} T_a + \sigma_{BA} T_b \quad (3)$$

Onde $\sigma_{AB} T_a$ e $\sigma_{BA} T_b$ representam o coeficiente de Seebeck em cada termojunção do circuito a suas respectivas temperaturas. É importante ressaltar a mudança na representação da escrita, referindo-se a ordem como os materiais aparecem no circuito, considerando o caminho elétrico que era percorrido na malha. Esta alteração de representação indica também a inversão de polaridade, concluindo que $\sigma_{AB} = -\sigma_{BA}$. Assim, é possível substituir o termo σ_{BA} na equação, resultando em outras duas Equações (4) e (5).

$$\Delta E = \sigma_{AB} T_a - \sigma_{AB} T_b \quad (4)$$

$$\Delta E = \sigma_{AB} (T_a - T_b) \quad (5)$$

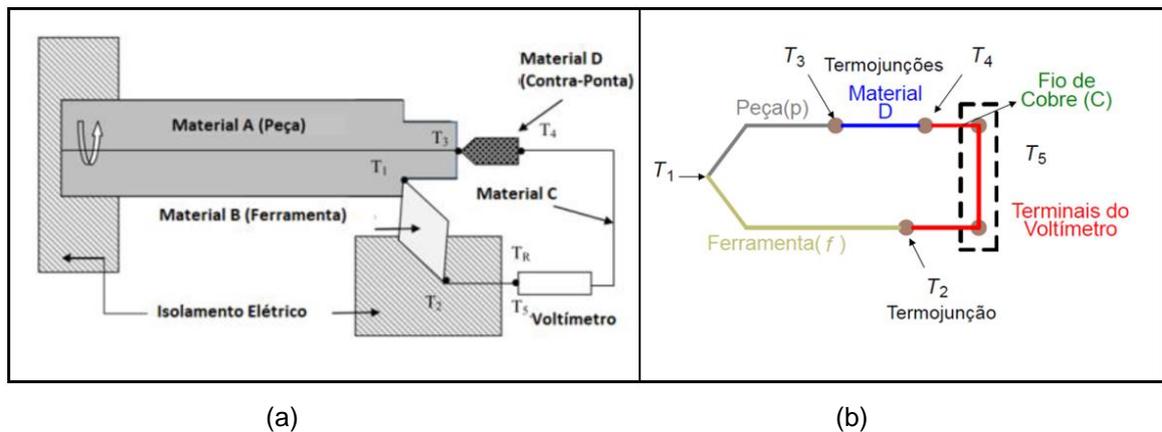
Com base na Equação 4 é possível determinar o valor de uma das temperaturas a partir do conhecimento da temperatura na outra termojunção. Rearranjando a equação e isolando a temperatura T_a se obtém-se a Equação 6, que também é utilizada no processo de calibração do sistema para relacionar a variação da temperatura e tensão, resultando em uma curva de calibração.

$$T_a = T_b + \frac{\Delta E}{\sigma_{AB}} \quad (6)$$

O circuito elétrico do termopar é de suma importância para que o método tenha maior precisão nas tensões e conseqüentemente na captação dos dados.

Com base neste princípio de funcionamento do efeito *Seebeck*, foi desenvolvido o circuito para o método termopar ferramenta peça (KAMINISE, 2012). A Figura 8 mostra uma simplificação do circuito que trabalha segundo o método termopar ferramenta-peça.

Figura 8 - (a) Simplificação do circuito termoelétrico no método termopar ferramenta-peça; (b) Esquemático simplificado do circuito contendo os elementos e termojunções.



Fonte: Adaptado de Kaminise, Guimarães, da Silva (2014)

O circuito que é utilizado no experimento é composto por vários materiais distintos, formando várias junções secundárias além do contato da ferramenta-peça (junção quente).

Sabendo que é possível fazer um somatório de forças eletromotrizes das junções, é possível gerar um circuito conforme Figura 8(b), conseqüentemente chegar a Equação 7 que irá representar a f.e.m. total do sistema. As forças eletromotrizes do sistema são: E_{fp} , produzida na junção ferramenta-peça, à temperatura T_1 ; E_{bf} , gerada na junção do fio de cobre com a ferramenta, à temperatura T_2 ; E_{pA} formada entre a peça e a contra-ponta, à temperatura T_3 ; E_{Ab} , originada na junção da contra-ponta com o fio de cobre, à temperatura T_4 , representadas por:

$$\Delta E = E_{fp}(T_1) + E_{bf}(T_2) + E_{pA}(T_3) + E_{Ab}(T_4) \quad (7)$$

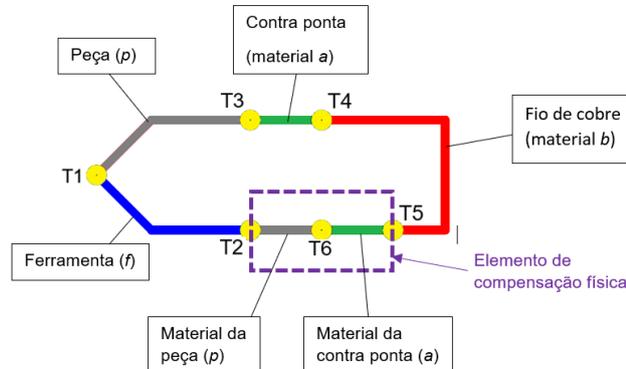
Analisando a Equação 7 é possível afirmar que, as demais termojunções que são formadas por outros elementos do circuito, tem influencia no (ΔE) do sistema. Sendo assim a temperatura de todas as termojunções do circuito devem ser

consideradas (KAMINISE, 2012).

2.4.1 Compensação física no sistema termopar ferramenta-peça

Kaminise (2012) propôs um sistema alternativo para o experimento do termopar ferramenta-peça, para que produza um sinal de f.e.m. somente na temperatura T_1 , onde deverá medir a temperatura da interface peça ferramenta. Esta proposta deve minimizar a influência de junções secundárias que se formam nos diversos elementos de medição, simplificando o circuito elétrico do sistema e também agrega a calibração um método mais próximo do real, com uma função mais fiel ao comportamento do processo de usinagem. Sendo assim, o sistema uma vez calibrado estará apto para realizar o trabalho. A Figura 9 apresenta uma representação esquemática da proposta do circuito com sistema de compensação.

Figura 9 - Esquemático do circuito elétrico do sistema termopar ferramenta-peça com compensação.



Fonte: Adaptado de Kaminise (2012).

Conforme apresentado na Figura 9, foram adicionados dois materiais ao sistema. O material da peça e o material (a). Chamados aqui de elemento de compensação física que está posicionado entre T_2 e T_5 . Apresentados na Equação 8. Sendo assim, a equação foi reescrita:

$$\Delta E = E_{fp}(T_1) + E_{pd}(T_3) + E_{dc}(T_4) - E_{dc}(T_5) - E_{pd}(T_6) - E_{fp}(T_2) \quad (8)$$

Se considerarmos que as termojunções mais afastadas da região de corte, a temperatura nessas termojunções não sofrem interferência térmica, pode-se analisar que $T_3 = T_4 = T_5 = T_6$, assim a equação pode ser reescrita. Conforme mostra a

Equação 9:

$$\Delta E = E_{fp}(T_1) - E_{fp}(T_2) = K(T_1 - T_2) \quad (9)$$

Como pretendemos encontrar a temperatura, a equação pode ser rearranjada:

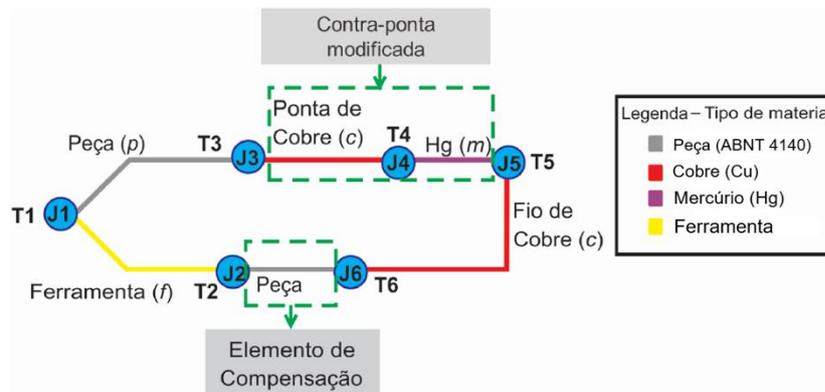
$$T_1 = T_2 + \frac{\Delta E}{K} \quad (10)$$

Analisando a Equação 10 que é um resultado equivalente a Equação 6. A temperatura T_1 pode se obter através da medição da f.e.m. (Voltímetro), a temperatura T_2 será na junção entre a ferramenta e a compensação física (Figura 9 com a compensação), utilizando um termopar, e da constante de calibração K .

2.4.2 Circuito termopar ferramenta peça para calibração

O esquema elétrico completo do método do sistema termopar ferramenta-peça está demonstrado na Figura 10. O circuito é formado por quatro tipos de materiais e seis termojunções (J1, J2, J3, J4, J5 e J6) e cada termo junção é formada por dois materiais distintos e cada termo junção com sua temperatura. A junção 1 é referente ao contato da ferramenta com a peça à temperatura T_1 . A temperatura T_2 corresponde ao contato da junção entre o elemento de compensação física e a ferramenta. A junção 3 é referente ao contato entre a ponta de cobre da contra-ponta modificada e a peça, e está à temperatura T_3 . No interior da contra-ponta modificada há um recipiente com mercúrio que permite o contato elétrico entre ponta de cobre e conector do fio de cobre, esta junção corresponde à temperatura T_4 e a junção entre o mercúrio e fio de cobre à temperatura T_5 . A última junção, que fecha o circuito, corresponde ao contato entre o fio de cobre e o elemento de compensação com temperatura T_6 .

Figura 10 - Representação do Esquema dos elementos formadores do circuito elétrico do sistema termopar ferramenta-peça.



Fonte: Adaptado de Lima Junior (2020).

Conforme a lei de *Kirchhoff*, pode-se atribuir uma equação para a tensão de todo sistema, já que as termojunções apresentadas produzem uma f.e.m.. A Equação 11 representa esta relação. Na equação, E_{fp} é a tensão gerada entre a ferramenta e a peça à temperatura $T1$. E_{pc} é gerada no contato entre a peça e a contra ponta à $T3$. A tensão E_{cm} se dá à $T4$ entre a ponta de cobre e o mercúrio. A tensão E_{mc} acontece na junta entre o mercúrio e o fio de cobre à $T5$. O contato entre o fio de cobre e o elemento de compensação física promove a tensão E_{cp} na temperatura $T6$. Por fim, com temperatura $T2$ na junção entre o elemento de compensação e a ferramenta há a geração de tensão, chamada de E_{pf} .

$$\Delta E = E_{fp}(T1) + E_{pc}(T3) + E_{cm}(T4) + E_{mc}(T5) + E_{cp}(T6) + E_{pf}(T2) \quad (11)$$

Ao inverter a ordem entre os elementos resultará na mudança de polaridade, por exemplo $E_{pf} = -E_{fp}$, é possível reorganizar a equação, formando a Equação 12.

$$\Delta E = E_{fp}(T1) + E_{pc}(T3) + E_{cm}(T4) - E_{mc}(T5) - E_{cp}(T6) - E_{fp}(T2) \quad (12)$$

Como já mostrado, as termojunções afastadas da região de corte não sofrem mudança na temperatura, se mantendo na temperatura ambiente. Assim, $T3 = T4 = T5 = T6 = T_{ambiente}$. Um ponto importante a ressaltar é que nas junções pelo contato com o mercúrio não é possível fazer a medição da temperatura, porém o recipiente de mercúrio se encontra em um ponto afastado da área de corte. sendo

assim a Equação 11 pode ser simplificada para a Equação 13.

$$\Delta E = E_{fp}(T1) - E_{fp}(T2) = K(T1 - T2) \quad (13)$$

Na calibração, a temperatura $T1$ corresponde a temperatura do termopar na junção ferramenta-peça. O termopar fixado na junção inserto de compensação representa $T2$. o Termo K corresponde a constante de proporcionalidade da equação, equivalente ao coeficiente de *Seebeck* do termopar. Rearranjando a Equação 13, isolando a temperatura, tem-se a Equação 14 para a temperatura.

$$T1 = T2 + \frac{\Delta E}{K} \quad \rightarrow \quad T_{interface} = T_{compensação} + \frac{\Delta E}{K} \quad (14)$$

Conforme Kaminise (2012), este método de calibração do sistema representa fielmente o experimento no momento da usinagem. Sendo assim, as expressões alcançadas neste procedimento, assim como a constante K , são de fontes confiáveis e precisas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais, os equipamentos e o método utilizado para realização deste trabalho.

Como apresentado no item 2.3.7, vários autores utilizaram o sistema ferramenta-peça através do efeito *Seebeck*, respeitando a lei de *Kirchoff*. Sendo assim, os dispositivos utilizados nos trabalhos, podem variar de um autor para outro. Neste trabalho foram desenvolvidos os dispositivos necessários para realizar a calibração e a medição da temperatura, que são apresentados na sequência.

3.1 Materiais

3.1.1 Corpo de prova

Foi utilizado um corpo de prova em aço ABNT 4140, que é um aço de baixa liga com boa resistência e boa temperabilidade, sendo usado em aplicações severas de abrasão, impacto, fadiga e tensões a altas temperaturas. É um aço versátil com destaque para aplicação no setor automotivo na confecção de virabrequins, eixos, engrenagens e parafusos de alta resistência. O corpo de prova utilizado nos ensaios possui diâmetro de 50,8mm e comprimento de 300mm.

Tabela 1- Composição química do aço ABNT 4140.

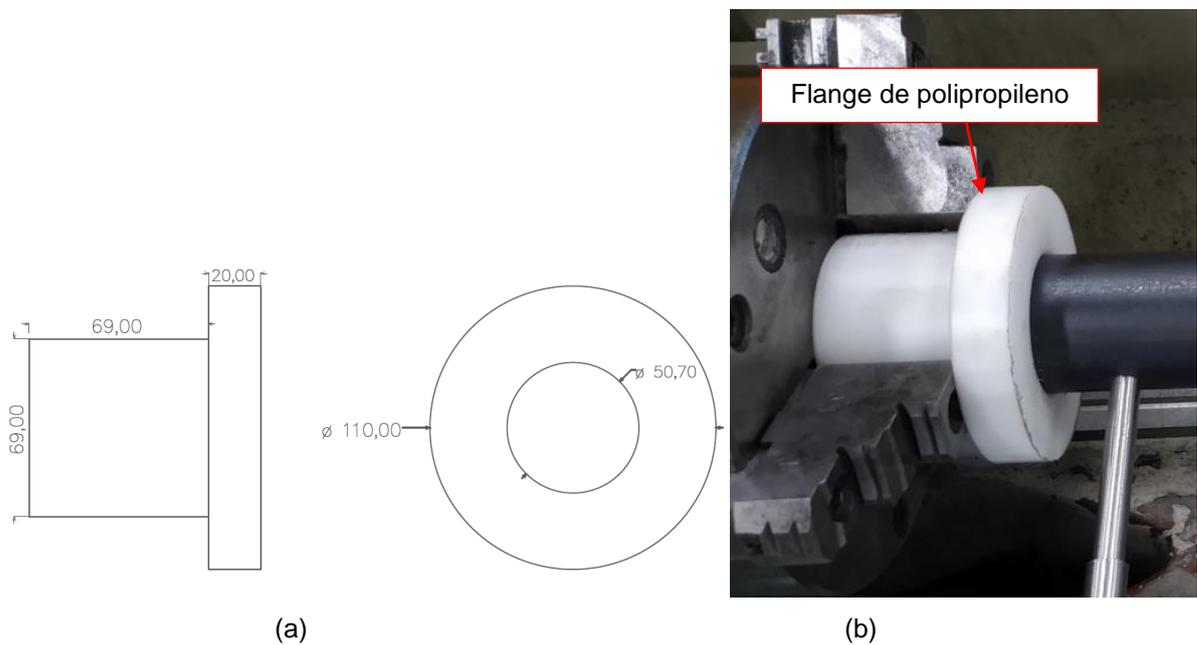
ABNT 4140 Composição Química (%)						
C	Mn	PMáx	SMáx	Si	Cr	Mo
0,38-0,43	0,75-1,00	0,03	0,04	0,15-0,35	0,80-1,10	0,15-0,25

Fonte: Gerdau (2022)

3.1.2 Flange de polipropileno

Para garantir o isolamento elétrico da peça de trabalho com a castanha do torno, foi fabricado um flange em polipropileno, onde a peça de trabalho é inserida na flange de polipropileno com interferência, garantido uma boa fixação.

Figura 11- (a) Dimensões da flange de polipropileno; (b) Flange posicionada na castanha do torno.



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.3 Elemento intermediário

Para facilitar o processo de aquecimento da calibração do sistema é necessário fabricar uma extensão do corpo de prova. Esta extensão é chamada de elemento intermediário, que é fabricada com o mesmo aço ABNT 4140. O elemento é fixado por interferência através de um furo feito na peça e irá receber o calor gerado pela chama do maçarico oxiacetileno. A Figura 12 mostra o elemento intermediário desenvolvido e fixado no corpo de prova.

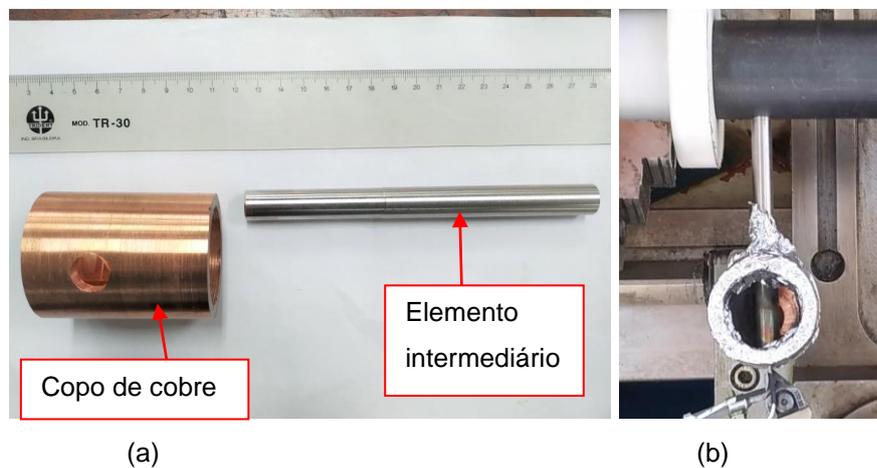
Figura 12 - Elemento intermediário fixado ao corpo de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor(2022)

Para que o processo de aquecimento do elemento intermediário seja realizado sem sofrer variações na captação dos dados da temperatura e concentrar a chama no elemento intermediário, foi fabricado uma peça em cobre com o formato de copo, conforme apresentado na Figura 13. Para acoplar o elemento intermediário neste “copo” foram feitos dois furos transversais para que o elemento intermediário transfixe com interferência, evitando assim que a peça se mova. A peça de cobre foi revestida com camadas de papel alumínio, visando diminuir a troca de calor do elemento intermediário com a temperatura ambiente.

Figura 13 - (a) Peça (copo) de cobre e elemento intermediário; (b) Peça acoplada no elemento intermediário.

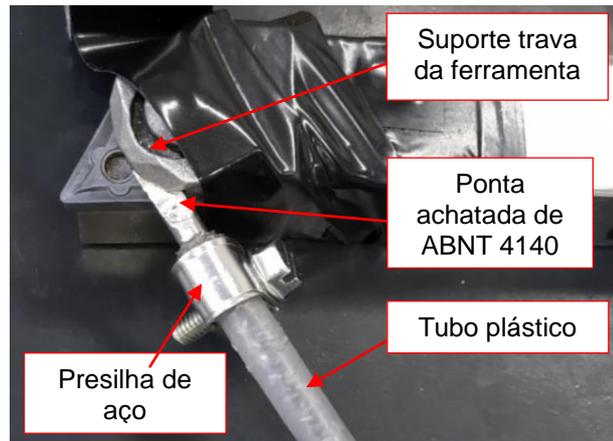


Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

3.1.4 Elemento de compensação física

Para o elemento de compensação foi utilizado um tubo de plástico rígido com diâmetro de 6mm, confeccionado uma ponta achatada de aço ABNT 4140 e todo o interior do tubo plástico foi inserido e compactado cavacos do mesmo aço, conforme pode ser observado na Figura 14. A ponta achatada é fixada em uma das extremidades do tubo e presa com uma presilha de aço, que é posicionada entre a ferramenta e o suporte que trava a ferramenta. Na outra extremidade do elemento de compensação a conexão foi feita compactando os cavacos de aço a um fio de cobre.

Figura 14 - Elemento de compensação física posicionado no porta ferramenta.

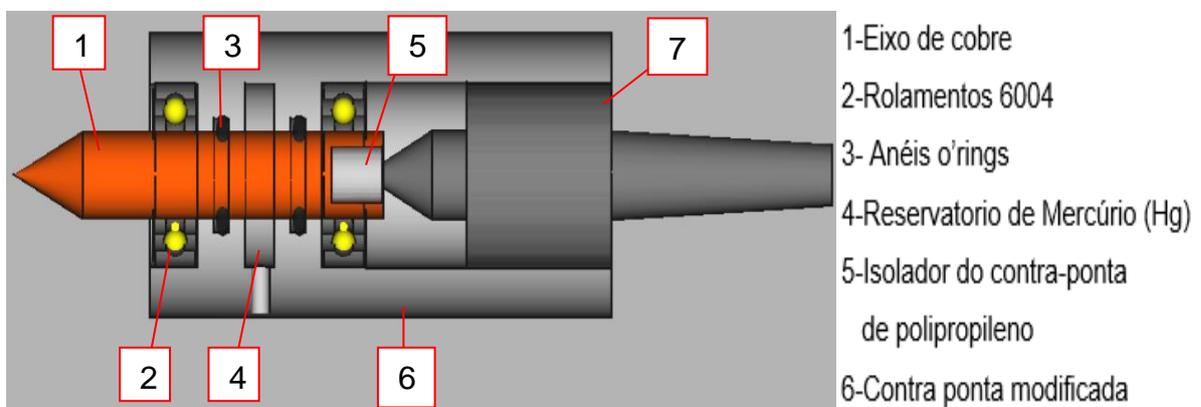


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.1.5 Contra-ponta modificada

Para que fosse possível ter um circuito elétrico fechado e isolado do restante do torno, foi necessário desenvolver um aparato que foi denominado como contra-ponta modificada, para apoiar a peça de trabalho. No processo de calibração do sistema, a peça de trabalho fica estática, porém, para os testes de usinagem a peça rotaciona. Sendo assim, foi necessário desenvolver um aparato que tivesse um reservatório de mercúrio (Hg) em contato com uma contra-ponta de cobre e com um parafuso de cobre para dar continuidade no circuito. A contra-ponta de cobre foi acoplada em dois rolamentos de esferas tipo 6004 vedados, para evitar o vazamento do mercúrio foram inseridos dois anéis o'rings. Este aparato é semelhante ao desenvolvido pelo Centro de Tecnologia da UFRN e citado por Silva (2018).

Figura 15 – Imagem em corte da contra-ponta desenvolvida.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A contra-ponta modificada foi confeccionada em polipropileno para garantir o isolamento elétrico para o restante do torno. Todos os elementos foram encaixados por interferência para conseguir uma maior rigidez e evitar folgas. O eixo de cobre está isolado da fixação da contra-ponta no torno, por meio de uma peça de polipropileno que foi encaixada na extremidade do eixo. O reservatório com mercúrio (Hg) faz a conexão elétrica com o eixo de cobre. O fechamento do reservatório de mercúrio é feito através de um parafuso de cobre que também está conectado com o mercúrio, realizando o fechamento do mercúrio. A Figura 16 apresenta a contra ponta fabricada.

Figura 16 - (a) Inserção do mercúrio (Hg) no reservatório da contra-ponta; (b) Verificação da condutividade entre a contra-ponta e o parafuso de cobre.



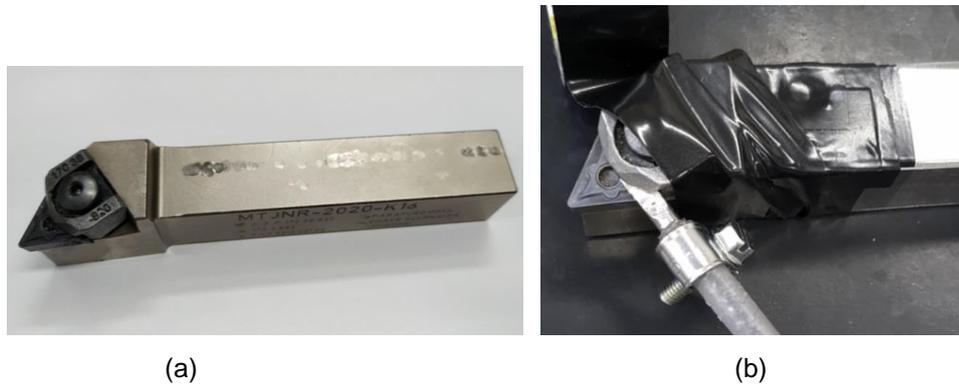
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.1.6 Ferramenta de corte e porta ferramentas

A ferramenta utilizada nos processos de calibração e torneamento foi o inserto de metal duro código TNMG 160408 revestido com oxido de alumínio, Al_2O_3 . Foi definido este inserto por ser muito utilizado no processo de usinagem e por ter características que mantém a condutividade elétrica do circuito.

O porta-ferramenta utilizado foi o modelo MTJNR 2020 K16. A isolação do porta-ferramenta para o castelo do torno foi feita instalando placas de policarbonato em volta de todo o porta-ferramenta. A Figura 17 mostra o porta ferramenta com a ferramenta montada.

Figura 17 - (a) Porta-ferramenta e ferramenta; (b) Ferramenta e o porta ferramenta com a isolação montada e o elemento de compensação.

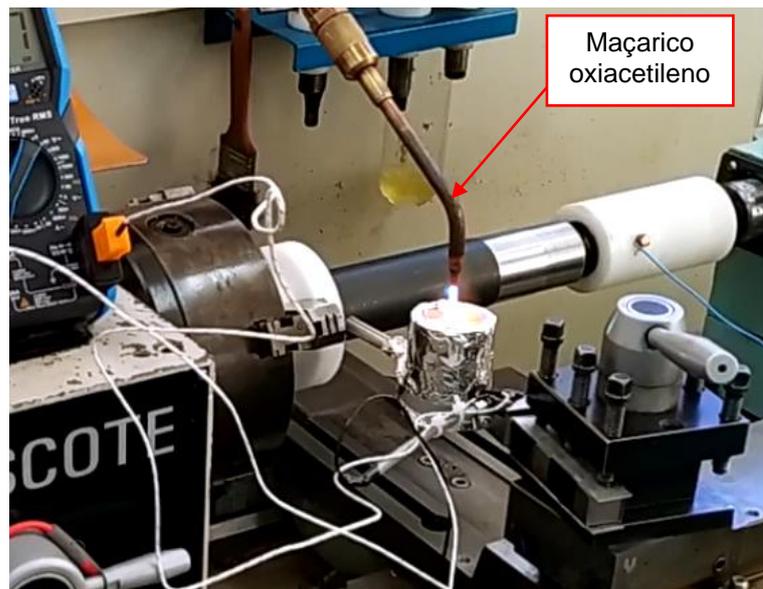


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.1.7 Montagem do sistema de aquecimento

O aquecimento do sistema ferramenta-peça para a realização da calibração foi feito através da chama de um maçarico oxiacetileno, o bico do maçarico foi direcionado para o elemento intermetálico posicionado no interior do “copo” de cobre conforme Figura 18.

Figura 18 - Aquecimento do elemento de compensação para realizar a calibração do sistema ferramenta-peça.

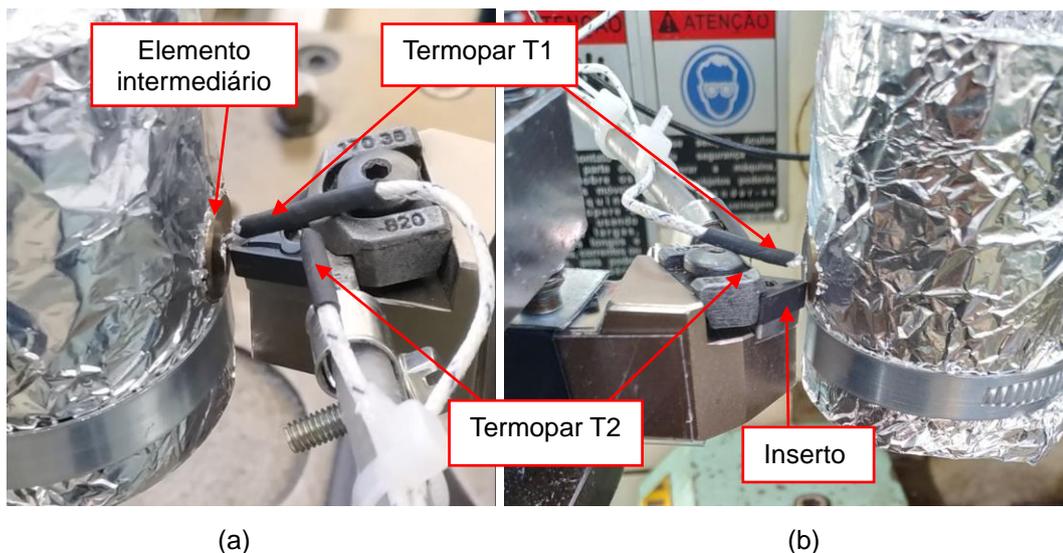


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.1.8 Instrumentos e sensores utilizados para aquisição dos dados

Neste trabalho foi utilizado dois termopares do tipo K, para medir a temperatura na interface ferramenta-peça e na junta de compensação durante o processo de calibração. O termopar tipo K (formado por fios de Chromel e Alumel) é indicado para medir temperaturas de -200°C até 1260°C , atendendo as temperaturas empregadas na calibração do sistema. Um termopar foi posicionado em um furo na extremidade do elemento de compensação com pasta térmica. O outro termopar posicionado e comprimido ao inserto, junto com a ponta achatada do elemento de compensação, através da fixação do porta-ferramenta, conforme Figuras 19.

Figura 19 - (a) Posições dos termopares; (b) Inserto em contato apenas com o elemento de compensação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

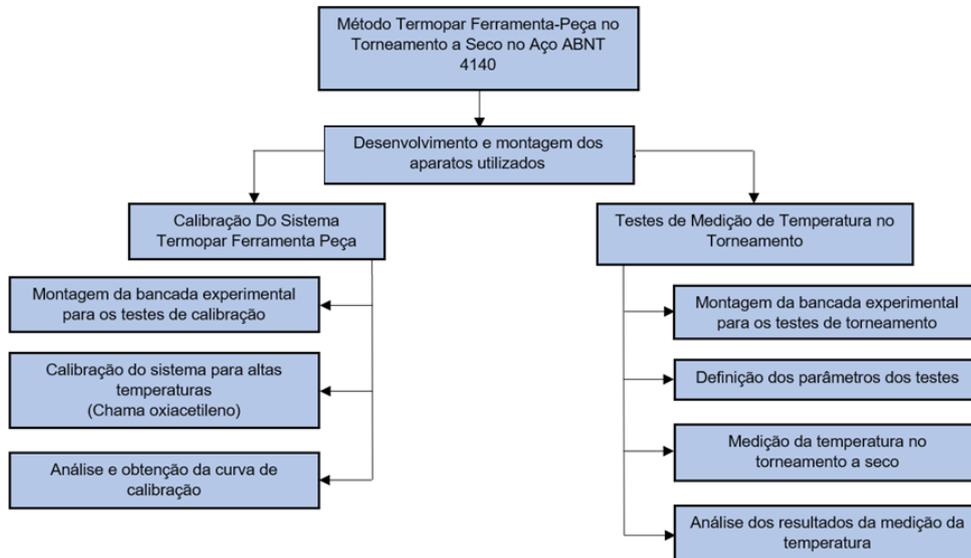
Para realizar a medição das temperaturas no processo de calibração, cada termopar foi conectado a um multímetro digital Minipa modelo ET-2042F, que trabalha na faixa de temperatura de -40°C até 1000°C . A tensão gerada no circuito foi medida através de um multímetro digital de precisão Tektronix modelo DMM4050.

3.2 Metodologia aplicada na calibração do sistema e ensaios

Para facilitar a compreensão do trabalho, o fluxograma da Figura 20

apresenta as atividades que foram desenvolvidas e descritas nos seguintes tópicos deste capítulo.

Figura 20 - Fluxograma das atividades para realização do trabalho.



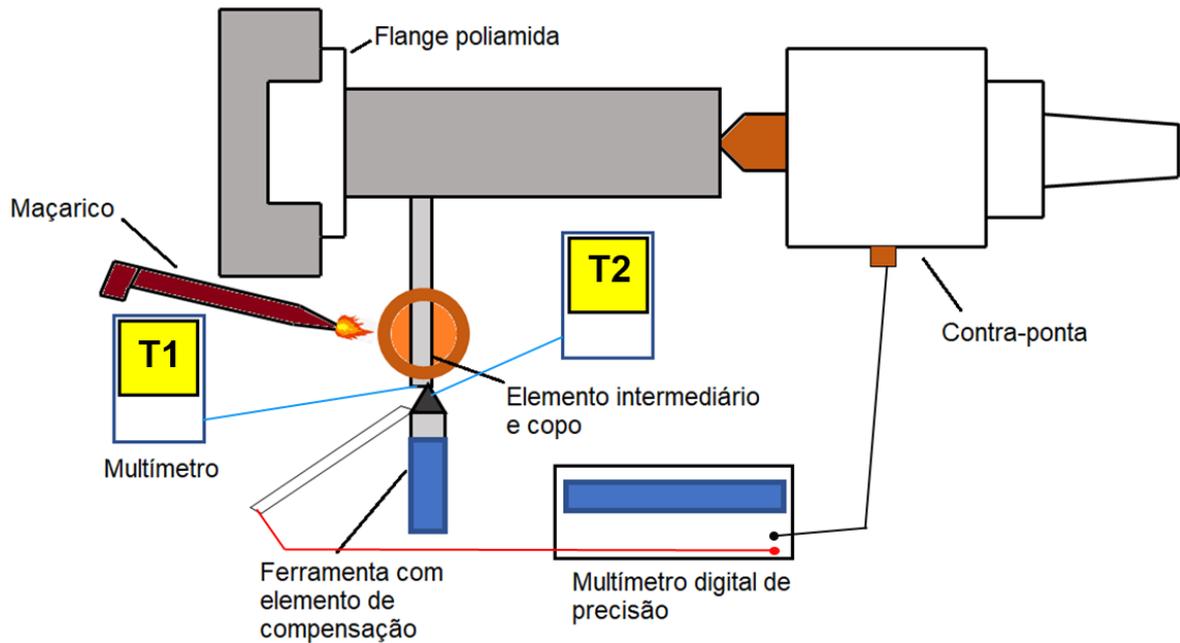
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.2.1 Método de calibração do sistema termopar ferramenta-peça

A calibração do sistema termopar ferramenta-peça é um processo de suma importância para a realização das medições da temperatura, a calibração tem como principal objetivo definir a relação entre a variação das temperaturas na interface ferramenta-peça e na junta de compensação com a tensão elétrica obtida no circuito.

A Figura 21 apresenta um esquema do sistema de calibração utilizado neste trabalho. É possível observar o elemento intermediário fixo no copo de cobre que é aquecido por uma chama. A ferramenta junto com elemento de compensação está em contato com o elemento intermediário, fechando o circuito

Figura 21 – Esquema de calibração do sistema ferramenta-peça.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

3.2.2 Bancada experimental

A bancada experimental para realizar a calibração foi montada em um torno Nardini modelo Mascote, com a distribuição dos materiais exatamente igual ao esquema da Figura 21. Foram realizadas verificações com um multímetro, para garantir que o sistema tinha condutividade entre os elementos e isolamento para o restante do torno.

Figura 22 - Bancada montada para realização da calibração do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

3.2.3 Obtenção e análise da curva de calibração

O sistema foi aquecido com um maçarico, conforme Figura 18. A temperatura no processo de calibração iniciou em temperatura ambiente, em torno de 20°C, e atingiu 800°C como temperatura máxima no elemento intermediário.

Após a obtenção dos valores da temperatura T1 (temperatura do elemento intermediário), T2 (temperatura do elemento de compensação) e as tensões geradas no circuito ΔE . Foi relacionado a tensão do circuito com as diferenças de temperaturas entre T1-T2. Os dados das medições no processo de calibração do sistema foram registrados para a obtenção de uma curva de calibração.

3.2.4 Definição dos parâmetros e testes de usinagem

Após a calibração foram realizados os ensaios de usinagem para a determinação da temperatura no processo. Para isto, foram removidos o elemento intermediário fixo na peça e o copo e posicionado a ferramenta para a realização da usinagem.

Os parâmetros de corte utilizados foram definidos após a realização de alguns pré-testes e foi possível observar que a fixação do inserto na porta ferramenta ficou fragilizado devido a inserção da chapa de aço ABNT 4140 do elemento de compensação entre o inserto e o grampo de fixação do porta ferramenta.

Também foi possível notar uma limitação na fixação do flange de polipropileno e da peça de trabalho na castanha do torno. Dessa forma, foi definido a utilização de parâmetros de usinagem não muito severos. Assim foram definidos os parâmetros de teste de usinagem, segundo a tabela 2. Os ensaios foram realizados com variação de velocidade (RPM) de profundidade de corte (ap) e avanço (f).

Os valores das tensões obtidas em cada ensaio foram registrados para posteriormente obtenção das temperaturas na interface ferramenta-peça. Os ensaios de usinagem foram realizados sem a utilização de fluidos de corte.

Tabela 2- Parâmetros de usinagem.

	RPM	ap (mm)	Avanço (f)
Ensaio 1	1000	0,25	0,15
Ensaio 2	315	0,25	0,15
Ensaio 3	800	0,25	0,15
Ensaio 4	630	0,25	0,15
Ensaio 5	500	0,25	0,15
Ensaio 6	315	0,25	0,094
Ensaio 7	500	0,25	0,094
Ensaio 8	800	0,25	0,094
Ensaio 9	1000	0,5	0,094
Ensaio 10	500	0,5	0,094

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

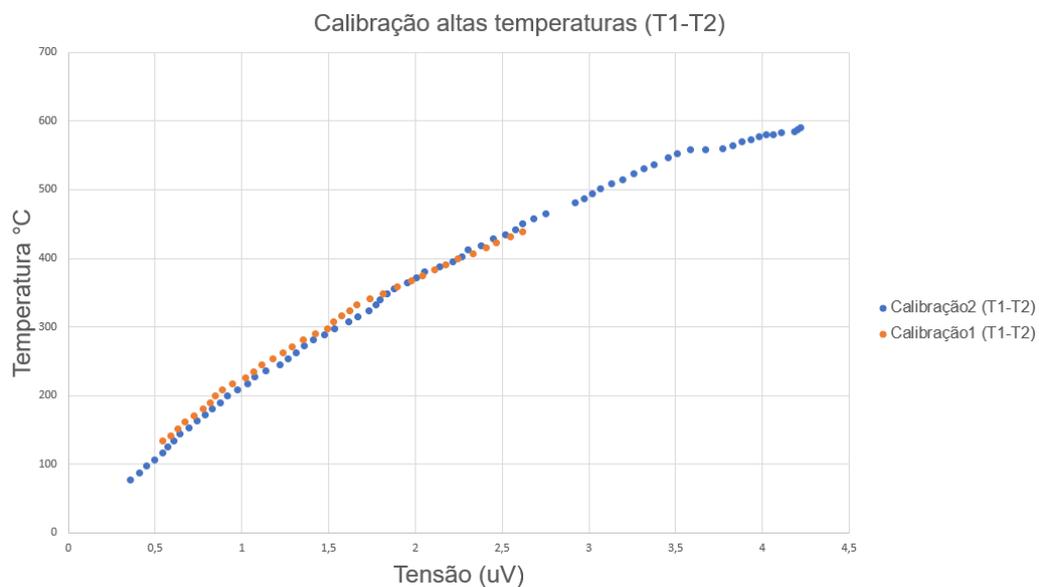
4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após a realização da calibração do sistema ferramenta-peça e dos ensaios de usinagem a seco, foi possível relacionar as tensões obtidas nos ensaios com os dados da tensão e temperatura que foram obtidos na calibração.

4.1 Análise da curva de calibração

Foram realizados dois ensaios de calibração, ambos iniciaram em temperatura ambiente em torno de 25°C, o primeiro ensaio teve como temperatura máxima 510°C. Já o segundo teste obteve como temperatura máxima 800°C ambas as temperaturas medidas no elemento intermediário, estes dados da temperatura foram relacionados às suas respectivas tensões, gerando o gráfico da Figura 23.

Figura 23 - Curva de calibração para altas temperaturas.



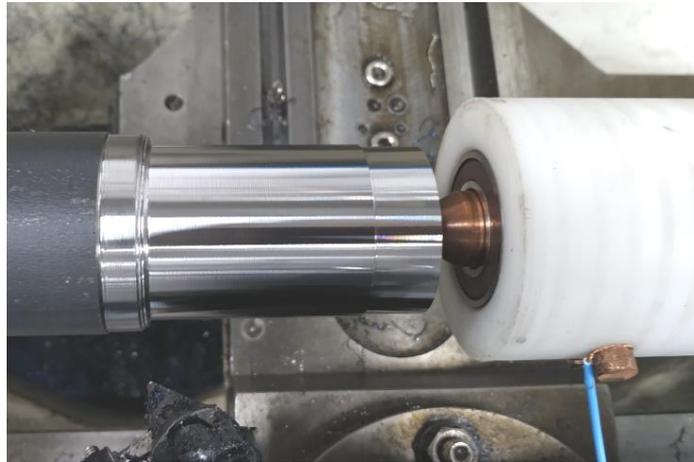
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando os resultados obtidos nas duas calibrações do sistema, apresentados na Figura 23, é possível verificar que não ocorram diferenças significativas entre os dois ensaios realizados. É possível verificar que o gráfico tem uma forma de curva com queda suave.

4.2 Ensaios de medição da temperatura na usinagem

Foram realizados dez ensaios de usinagem, cada ensaio foi usinado 70mm na peça de trabalho. Os resultados dos ensaios foram registrados em planilhas, visando a normalização do sistema de captação dos dados. A Figura 24 mostra o detalhe da peça usinada.

Figura 24 - Corpo de prova após a realização dos ensaios de usinagem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A tabela 3 apresenta os resultados das tensões obtidas em cada ensaio de usinagem, para diferentes rotações, avanços e profundidade de corte. Os valores da temperatura foram determinados a partir da curva obtida no ensaio de calibração.

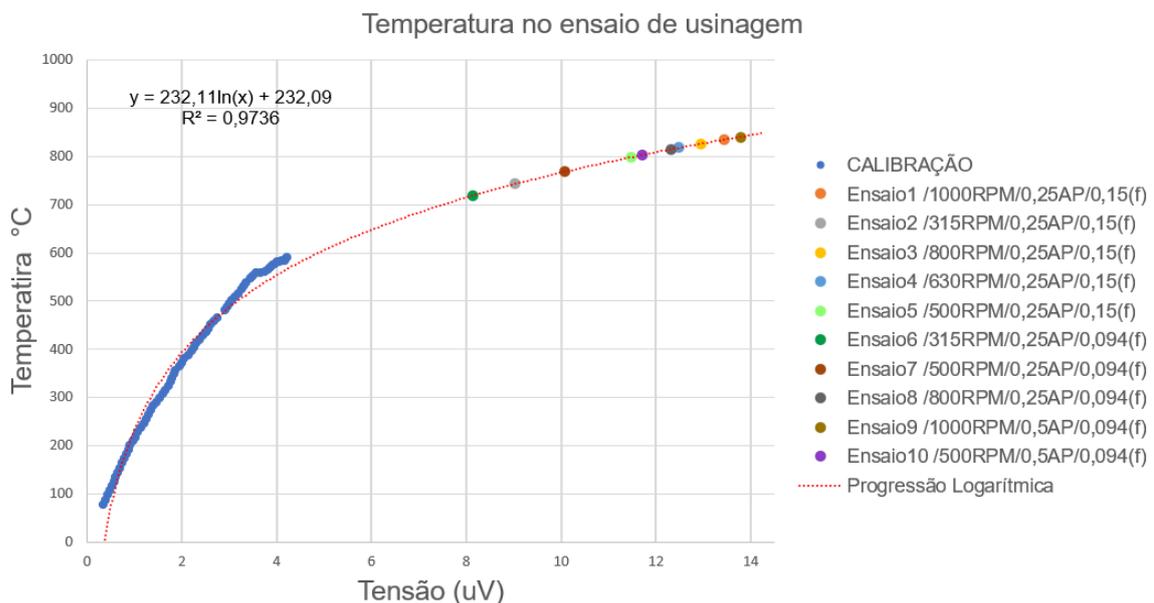
Tabela 3 - Resultado dos ensaios de usinagem.

	RPM	ap (mm)	Avanço (f)	Tensão (uV)	Diâmetro (mm)	Temp. °C
Ensaio1	1000	0,25	0,15	13,44	52	835
Ensaio2	315	0,25	0,15	9,03	51	743
Ensaio3	800	0,25	0,15	12,95	50	827
Ensaio4	630	0,25	0,15	12,48	49,5	818
Ensaio5	500	0,25	0,15	11,47	48	798
Ensaio6	315	0,25	0,094	8,15	47	719
Ensaio7	500	0,25	0,094	10,07	44	768
Ensaio8	800	0,25	0,094	12,33	43,5	815
Ensaio9	1000	0,5	0,094	13,78	43	840
Ensaio10	500	0,5	0,094	11,7	42,5	802

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A Figura 25 mostra a representação da curva de progressão logarítmica obtida a partir dos pontos experimentais de calibração, em linha grossa. É possível verificar que os pontos obtidos no ensaio de usinagem estão bem acima dos valores de temperatura e tensão utilizados na calibração. Assim, seria interessante se o processo de calibração atingisse valores superiores, mas não foi possível devido às limitações no sistema, que foi aquecido com maçarico. Estas limitações incluem uma possível fusão do copo de cobre utilizado no aparato desenvolvido.

Figura 25 - Temperaturas dos ensaios de usinagem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

O valor mínimo obtido na usinagem foi de 719°C, na usinagem para a velocidade de corte e avanço mais baixos. Os valores de temperatura aumentaram de forma proporcional ao aumento da velocidade de corte e avanço. A temperatura máxima dos testes foi de 840°C, que ocorreu quando foram utilizadas maiores velocidades de corte ($v_c=163$ m/min) e avanço $f=0,15$ mm/rev. Estes resultados confirmam a influência da velocidade de corte e avanço na temperatura da usinagem, conforme apresentado por Trent e Wright (2000) e Machado et al. (2009).

5 CONCLUSÃO

O dispositivo tipo termopar ferramenta-peça desenvolvido neste trabalho permitiu obter as temperaturas na interface cavaco ferramenta no torneamento de um aço ABNT 4140 utilizando o princípio de *Seebeck*. Este método possibilitou a obtenção da temperatura em uma região da ferramenta de difícil acesso a outros métodos de medição de temperatura.

Nos ensaios de calibração, o resultado da curva gerada em forma de gráfico, mostrou uma leve curva descendente, conforme a temperatura iria aumentando. Desta forma, o resultado foi considerado aceitável, para utilização dos ensaios de medição da temperatura por meio de uma projeção para temperaturas maiores do que as atingidas na calibração. Os resultados da calibração também mostraram uma boa repetibilidade, os dois ensaios realizados apresentaram curvas idênticas.

Os resultados de medição da temperatura no processo de torneamento são considerados satisfatórios, mostrando um aumento da temperatura com um aumento da velocidade de corte e avanço, coerente com o apresentado pela literatura. Os valores obtidos de temperatura máxima também foram considerados coerentes, o valor de 840°C também está próximo ao relatado pela literatura.

Sugere-se para trabalhos futuros:

Realizar a calibração do sistema com temperaturas maiores que 800°C, pois com o “copo” de cobre revestido com folhas de alumínio não foi possível aumentar a temperatura do ensaio. Testar outro material para o copo que permita trabalhar com temperaturas maiores

Melhorar a rigidez do sistema de fixação e da ferramenta para permitir trabalhar com usinagem com parâmetros de corte maiores. Desenvolver novo sistema de fixação, diferente do flange de polipropileno utilizado para fixar e isolar o eixo usinado na castanha do torno.

REFERÊNCIAS

DAVIES, M. A. et al. **On The Measurement of Temperature in Material Removal Processes**. CIRP Annals, v. 56, n. 2, p. 581–604, 1 jan. 2007

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1970. 751 p.

GERDAU, **Tabela Gerdau de Composição Química para Construção Mecânica**. Disponível em: http://www2.gerdau.com.br/sites/default/files/2020-10/Tabela_Composicao_Quimica.pdf

Acesso em 28 de jun. de 2022.

KAMINISE, Almir Kazuo. **Estudo da Influência do material do Porta-Ferramenta sobre temperaturas de usinagem no torneamento**. 2012. 103 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

KAMINISE, Almir Kazuo; GUIMARÃES, Gilmar; DA SILVA, Márcio Bacci. Development of a tool–work thermocouple calibration system with physical compensation to study the influence of tool-holder material on cutting temperature in machining. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 73, n. 5, p. 735-747, 2014.

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

LIMA JUNIOR, E.D. **Medição da temperatura de corte no torneamento do aço ferramenta AISI D6 temperado e revenido auxiliado por In2**. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2020.

MACHADO, A., ABRÃO, A.M., COELHO, R.T., SILVA, M.B. **Teoria da Usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2009, 371p.

NAVES, Vitor Tomaz Guimarães. **Calibração de um sistema termopar ferramenta-peça para medição de temperatura de usinagem.** 2006. 35 f. TCC (Graduação) - Curso de Licenciatura Plena em Física, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

REZENDE, Bruna Aparecida; DE CASTRO MAGALHÃES, Frederico; RUBIO, Juan Carlos Campos. Study of the measurement and mathematical modelling of temperature in turning by means equivalent thermal conductivity. **Measurement**, v. 152, p. 107275, 2020.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais.** São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2007. 246 p.

SHAW, Milton Clayton; COOKSON, J. O. **Metal cutting principles.** New York: Oxford university press, 2005.

SILVA, Ana Carolina Ribeiro. **Calibração de um sistema para medição da temperatura de corte pelo método termopar ferramenta-peça.** 2018. 29 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, John S. **Metal Cutting Theory and Practice.** 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. 947 p

STEPHENSON, D. A., 1993, **Tool-work thermocouple temperature measurements - theory and implementation issues**, Journal of Engineering for Industry, 115:432-437.

TRENT, Edward M. *et al.* **Metal Cutting.** 4. ed. Woburn: Butterworth–Heinemann, 2000. 464 p.