



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Estimações das temperaturas no torneamento usando problemas inversos em  
medições por termovisor e termopares**

**Fernando Viana Avelar Dutra**

**Itajubá-MG, Julho de 2021**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Fernando Viana Avelar Dutra**

**Estimações das temperaturas no torneamento usando problemas inversos em  
medições por termovisor e termopares**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), da  
Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI),  
como parte dos requisitos para obtenção do Título  
de Mestre em Engenharia Mecânica.**

**Área de Concentração: Térmica, Fluidos e Máquinas de Fluxo**

**Orientador: Prof. Dr. Sandro Metreville Marcondes de Lima e Silva  
Coorientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira**

**Julho 2021  
Itajubá-MG**

DUTRA, Fernando Viana Avelar

Estimações das temperaturas no torneamento usando problemas inversos em medições por termovisor e termopares /Fernando Viana Avelar Dutra –

Itajubá: UNIFEI, 2020.

61p.

Dissertação – Universidade Federal de Itajubá, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva

Coorientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira

1. – Transferência de Calor – Torneamento – Ferramenta de Corte –  
Problemas Inversos

I. Lima E Silva, Sandro M. M. II. Universidade Federal de Itajubá III.  
Estimações das temperaturas no torneamento usando problemas inversos em  
medições por termovisor e termopares

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Fernando Viana Avelar Dutra**

**Estimações das temperaturas no torneamento usando problemas inversos em  
medições por termovisor e termopares**

Dissertação de mestrado aprovada por banca examinadora em  
19 de julho de 2021, conferindo ao autor o título de **Mestre em  
Ciências em Engenharia Mecânica**

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Christian Jeremi Coronado Rodriguez – UNIFEI

Prof. Dr. Elisan dos Santos Magalhães – ITA

Prof. Dr. João Roberto Ferreira – UNIFEI – Coorientador

Prof. Dr. Rogério Fernandes Brito – UNIFEI

Prof. Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva –  
UNIFEI – Orientador

Itajubá

2021

## **Dedicatória**

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus, o qual me guiou e sempre me guia para situações que me desenvolvem como humano. Dedico também ao meu pai Sebastião Jesus Avelar Dutra e a minha mãe Marly Aparecida Viana Dutra por todo apoio que dão ao meu percurso de vida, graças a eles eu pude chegar a fazer essa dissertação.

## **Agradecimentos**

Este trabalho pôde ser feito graças à ajuda de muitas pessoas. Presto homenagem:

Ao meu pai Sebastião Jesus Avelar Dutra e minha mãe Marly Aparecida Viana Dutra, que sempre se empenharam ao máximo em me apoiar nos sonhos. Essa dissertação também pertence a eles.

A minha irmã Flávia Viana Avelar Dutra e ao meu irmão Gustavo Viana Avelar Dutra por serem tão companheiros.

Ao meu orientador Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva, pela orientação bem feita e apoio na realização do trabalho.

Ao meu coorientador Dr. João Roberto Ferreira, pelo apoio técnico e disposição em fornecer meios experimentais.

Aos meus colegas de trabalho Diego Corrêa Ferreira e Rodrigo Gustavo Dourado da Silva que me deram grande suporte técnico e teórico.

Ao técnico José Veríssimo Ribeiro de Toledo pelo suporte e disposição em ajudar nos experimentos.

Aos colegas Wilson Altair da Silva, Bruno de Campos Salles Anselmo e demais membros do laboratório, pelo suporte.

Ao Conselho de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro através da concessão de bolsa de mestrado durante dois anos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

A todos os professores, colegas, técnicos, familiares e amigos que ajudaram de forma direta ou indireta na conclusão deste trabalho.

## **Epígrafe**

*“Você fará melhor se instigar outras pessoas a aprender.”*

Katherine Johnson, 2017.

## Resumo

**Dutra, F. V. A. (2021)**, *Estimações das temperaturas no torneamento usando problemas inversos em medições por termovisor e termopares*, Itajubá, 61p. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

A usinagem desempenha um papel importante na fabricação de peças mecânicas. Este trabalho analisa especificamente o torneamento, o qual é um dos processos de usinagem. Quando se analisa o aspecto geral no torneamento percebe-se altos esforços atuando na região de corte. Os altos esforços junto às pequenas dimensões do contato cavaco-ferramenta contribuem no desenvolvimento de altas temperaturas de corte. Além disso, a temperatura é um fator crucial associado ao desgaste da ferramenta. O foco deste trabalho foi de analisar as temperaturas na interface cavaco-ferramenta. O modelo tridimensional de análise para as temperaturas agrupava o calço, o suporte da ferramenta, o grampo e a ferramenta. A solução do problema foi dividida em duas partes: uma aplicando técnicas inversas, e a outra com a solução do problema direto. As técnicas inversas usadas foram a Função Especificada Não Linear e a Regularização de Viagem no Tempo. Essas técnicas foram aplicadas através da ferramenta LiveLink que integra o COMSOL<sup>®</sup> e o MATLAB<sup>®</sup>. A solução direta do problema envolve resolver a equação da difusão de calor tridimensional não linear em regime transiente. Dentre as condições de contorno do problema direto encontra-se a de fluxo de calor imposto no contato cavaco-ferramenta. Esse fluxo de calor desempenha um papel fundamental na resolução do problema. Em aspectos gerais, esse fluxo de calor permitia ao problema direto fornecer estimações de temperaturas que eram comparadas com os valores experimentais. Na experimentação foi usada uma ferramenta de metal duro. Termopares e uma câmera termográfica foram os responsáveis pelas medições das temperaturas. Os resultados das simulações foram analisados e comparados com os valores obtidos experimentalmente. Realizou-se uma comparação entre os fluxos de calor estimados pela Função Especificada Não Linear e pela Regularização de Viagem no Tempo. Também pontuou-se diferenças quanto ao uso de câmera térmica ou termopares na abordagem do problema inverso.

**Palavras-chave:** Transferência de Calor, Torneamento, Ferramenta de Corte, Problemas Inversos.

## Abstract

**Dutra, F. V. A. (2021)**, *Temperature estimations in turning by thermal camera and thermocouples measurements using inverse problems*, Itajubá, 61p. Master of Science Dissertation, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Machining plays an important role in the manufacturing of mechanical parts. This work analyzes specifically the turning, which is one type of the machining processes. When it is studied the general aspect of turning, one realizes high efforts acting on the cutting zone. The high efforts along with the small dimensions of the insert-chip contact area contribute to the development of high cutting temperatures. Furthermore, the temperature is an important factor associated with the wear of cutting tools. The focus of the work was to analyze the temperatures developed at the insert-chip interface. It was used in the analysis a model assembling the shim, tool holder, clamp and cutting tool. This model was represented three-dimensionally. The solution of the problem was divided into two parts: one applying inverse techniques, and another with the solution of the direct problem. It was used as inverse techniques the Nonlinear Function Specification Method (NFSM) and the Time Traveling Regularization (TTR). These techniques were applied by using LiveLink for MATLAB<sup>®</sup>, which integrates COMSOL<sup>®</sup> with MATLAB<sup>®</sup>. The direct solution of the problem relates to solving the three dimensional non-linear transient diffusion equation. Among the boundary conditions of the direct problem, one is the heat flux imposed at the insert-chip contact area. This heat flux is essential for the solution of the problem. In general, this heat flux allows the direct problem to estimate temperatures; these estimations are then applied into the inverse problem and compared to experimental values of temperature. Comparing the estimated temperatures with the experimental ones provided new information about the heat flux, which was updated and again used into the direct problem. For the experiments it was used an insert of cemented carbide. Thermocouples and a thermal imaging camera were used for temperature measurements. The results of the simulations were analyzed and compared to experimental values. Comparisons were made between the heat flux values estimated by the NFSM and by the TTR. In addition were highlighted the differences in estimations regarding the use of thermal camera or thermocouples in the inverse problem approach.

**Keywords:** Heat transfer; turning; cutting tool; inverse problems.

## Sumário

Dedicatória.....	5
Agradecimentos .....	6
Epígrafe .....	7
Resumo .....	8
Abstract.....	9
Sumário.....	x
Lista de Figuras .....	xii
Lista de Tabelas .....	xiv
Lista de Símbolos .....	xv
Letras Latinas.....	xv
Letras Gregas .....	xv
Abreviaturas e Siglas .....	xvi
1.    INTRODUÇÃO .....	17
1.1    Justificativa.....	17
1.2    Desenvolvimento do Trabalho.....	18
1.3    Objetivo .....	19
2.    REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1    Usinagem.....	20
2.2    Temperatura de corte .....	22
2.3    Técnicas inversas aplicadas na usinagem.....	26
3.    METODOLOGIA .....	29
3.1    Descrição do problema .....	29
3.2    Propriedades Térmicas .....	30
3.3    Modelo Térmico .....	33
3.4    Problema Direto.....	34

3.5	Problema Inverso .....	35
3.5.1	Método da Função Especificada Não Linear .....	35
3.5.2	Método da Regularização de Viagem no Tempo .....	37
3.6	Solução Numérica.....	37
3.7	Análise de Malhas .....	39
4.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	42
5.	RESULTADOS .....	45
5.1	Seleção dos Resultados.....	45
5.2	Função Especificada Não Linear e Termopares .....	45
5.3	Análise das técnicas NFSM e TTR.....	51
5.4	Função Especificada Não Linear e Câmera Térmica .....	52
6.	CONCLUSÕES.....	57
6.1	Conclusões Gerais .....	57
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	58
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	59

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Fontes de geração de calor no torneamento.....	21
Figura 2.2 - Distinção entre problema direto e inverso, considerando o contexto do trabalho. .....	26
Figura 3.1- Montagem usada para as simulações numéricas. ....	30
Figura 3.2 - Condutividade térmica do aço ABNT 4340 e do metal duro. ....	31
Figura 3.3 - Calor específico do aço ABNT 4340 e do metal duro. ....	32
Figura 3.4 - Emissividade do metal duro variando com a temperatura. ....	32
Figura 3.5 - Modelo térmico do problema abordado.....	34
Figura 3.6 - Malha 1. ....	39
Figura 3.7 - Malha 2. ....	39
Figura 3.8 - Malha 3. ....	40
Figura 3.9 - Malha 4. ....	40
Figura 3.10 - Análise de convergência das temperaturas estimadas. ....	41
Figura 4.1 - Representação dos termopares e elementos do torneamento.....	42
Figura 4.2 - Sistema de medição evidenciando a câmera termográfica. ....	43
Figura 4.3 - Área de contato cavaco-ferramenta real (A) e sua reprodução em CAD (B). ....	44
Figura 5.1 - Fluxo de calor estimado pela Função Especificada Não Linear.....	46
Figura 5.2 - Evolução das temperaturas no modelo 3D. ....	47
Figura 5.3 - Estimções pelo termopar 1; representação isotérmica no instante $t = 50$ s.....	48
Figura 5.4 - Posição dos termopares.....	48
Figura 5.5 - Temperaturas experimentais e estimadas do termopar 1. ....	49
Figura 5.6 - Temperaturas estimadas de todos os termopares considerados. ....	50
Figura 5.7 - Temperaturas experimentais e estimadas do termopar 2 (a) e termopar 3 (b).....	50
Figura 5.8 - Termopar 1; distribuição de temperatura indicando o ponto crítico e gráfico associado.....	51
Figura 5.9 - Fluxo estimado pela NFSM e pela TTR. ....	52
Figura 5.10 - Temperaturas medidas pela câmera antes e após o filtro.....	53
Figura 5.11 - Temperaturas medidas pelo termopar 1 e pela câmera térmica.....	53
Figura 5.12 - Fluxo de calor estimado pela NFSM para o termopar 1 e para a câmera térmica. .....	54
Figura 5.13 - Estimções pela câmera; representação isotérmica no instante $t = 50$ s.....	55
Figura 5.14 - Temperaturas experimentais e estimadas da câmera térmica. ....	55

Figura 5.15 - Câmera térmica; distribuição de temperatura indicando o ponto crítico e gráfico associado.....56

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Propriedades consideradas constantes.....	33
Tabela 3.2 - Características das malhas usadas. ....	40
Tabela 5.1 - Posição dos termopares. ....	48

## Lista de Símbolos

### Letras Latinas

$a_p$	Profundidade de corte [mm]
$c$	Calor específico [J/kg°C]
$f$	Avanço [mm/rot]
$F_{obj}$	Função objetivo
$h$	Coefficiente de transferência de calor por convecção natural [W/m <sup>2</sup> K]
$i, jj$	Iterações
$k$	Condutividade térmica [W/m°C]
$k_{eq}$	condutividade térmica equivalente [W/m°C]
$M$	Instante de tempo [s]
$q$	Fluxo de calor [W/m <sup>2</sup> ]
$r$	Tempos futuros
$S$	Soma dos quadrados
$t$	Tempo [s]
$T_\infty$	Temperatura ambiente [°C]
$T_0$	Temperatura inicial [°C]
$T$	Temperaturas estimadas [°C]
$V_c$	Velocidade de corte [m/min]
$x, y, z$	Coordenadas cartesianas [mm]
$Y$	Temperaturas experimentais [°C]

### Letras Gregas

$\alpha$	Difusividade térmica [m <sup>2</sup> /s]
$\varepsilon$	Emissividade
$\rho$	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann [W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
$\phi$	Coefficientes de sensibilidade
$\Omega$	Domínio

## Abreviaturas e Siglas

2D	Modelagem bidimensional
3D	Modelagem tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de alumínio
ANOVA	Análise de variância
BDF	<i>Backward differentiation formula</i> / Fórmulas de Diferenciação Regressiva
CAD	<i>Computer Aided Design</i> /Desenho Auxiliado por Computador
Co	Cobalto
DIN	Deutsches Institut für Normung, Alemanha
GMRES	<i>Generalized minimum residual</i> / Método dos Mínimos Resíduos Generalizados
LN <sub>2</sub>	Nitrogênio líquido
max	Valor máximo
MEF	Método dos Elementos Finitos
MDF	Método das Diferenças Finitas
NFSM	<i>Nonlinear Function Specification Method</i> /Função Específica Não Linear ou Iterativa
RTC	Resistência térmica de contato
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Nitreto de silício
TiC	Carboneto de Titânio
TiN	Nitreto de titânio
TTR	<i>Time Traveling Regularization</i> / Regularização de Viagem no Tempo
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
WC	Carboneto de Tungstênio

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Justificativa

Usinagem é um dos mais difundidos processos na indústria de fabricação mecânica. Neste processo um material menos duro que a ferramenta de corte é cortado em pequenas partes, chamadas de cavaco. O torneamento é o processo de usinagem abordado nesse trabalho.

No torneamento a ferramenta de corte avança ao longo de uma peça que está em rotação. O material da ferramenta de corte influencia bastante na operação de usinagem. É muito importante fazer uma seleção apropriada do material da ferramenta dependendo da sua aplicação. Para produzir uma peça de boa qualidade e ao mesmo tempo atender necessidades econômicas, o material da ferramenta deve ter certas características. Algumas características importantes são dureza, especificamente dureza a quente, resistência ao desgaste, tenacidade, e estabilidade química com relação ao material da peça usinada (AHSAN *et al.*, 2012).

As ferramentas de corte apresentam variadas composições químicas, composições essas desenvolvidas para específicas operações de usinagem. Um composto inorgânico que pode ser destacado dentro das composições químicas é o carboneto. Os carbonetos se tornaram populares durante a Segunda Guerra Mundial. Eles ofereciam quintuplicar as velocidades de corte até então acessíveis pelas ferramentas de aço rápido. Dentre as ferramentas de carboneto as mais usadas são aquelas à base de Carboneto de Tungstênio (WC), embora algumas ferramentas à base de Carboneto de Titânio (TiC) são bastante usadas na indústria automobilística (LIANG e SHIH, 2015). Quando dito sobre ferramentas de metal duro a ideia não é pensar apenas no carboneto, mas sim quanto a materiais compósitos. As ferramentas de metal duro são baseadas em materiais compósitos consistindo, por exemplo, de partículas de WC ou TiC ligadas à uma matriz de Cobalto (Co). A ferramenta de corte usada nesse trabalho foi a de metal duro WC-Co.

A deformação envolvida no processo de usinagem é concentrada em um pequeno local, a região de corte, esse aspecto junto às elevadas forças de corte proporcionam o desenvolvimento de altas temperaturas nessa região. Elevadas temperaturas influenciam fortemente no desgaste da ferramenta e na integridade superficial da peça usinada, efeitos que afetam a economia do processo.

Devido à relevância da temperatura, serão feitas análises desta na superfície de contato cavaco-ferramenta. A área de contato cavaco-ferramenta é muito pequena e medições neste

local são de difícil acesso, sendo assim um problema para compreender o comportamento térmico nessa região. Técnicas para resolver problemas inversos são apresentadas como uma solução para esse problema. Essas técnicas em conjunto com soluções de problemas diretos permitem estimar a temperatura no contato cavaco-ferramenta a partir de temperaturas obtidas em regiões acessíveis (BRITO, CARVALHO e LIMA E SILVA, 2015). No presente trabalho, técnicas inversas serão usadas para estimação do fluxo de calor.

Dentre as formas usadas para classificar os métodos inversos, uma delas é quanto ao domínio do tempo no qual as medições foram usadas. Neste trabalho o domínio de tempo considerado nas técnicas para cada estimação foi o do instante estimado mais os passos de tempos futuros. As técnicas utilizadas são de natureza sequencial. O uso de tempos futuros é pontuado como uma forma de melhorar a estabilidade de algoritmos sequenciais (ÖZISIK e ORLANDE, 2000). As técnicas inversas usadas foram o método da Função Especificada Iterativa e o método da Regularização de Viagem no Tempo, as quais serão melhores indicadas na seção 3.5.

O objetivo do problema inverso era o de estimar o fluxo de calor que atuava como condição de contorno no problema direto. Ambas as técnicas inversas usadas para estimação do fluxo de calor partiam do princípio de minimizar a diferença entre as temperaturas estimadas e experimentais.

Os valores estimados de fluxo de calor e temperatura no trabalho foram validados através da comparação entre dados numéricos e experimentais de um processo de usinagem por torneamento. Deve ser pontuado que a validação foi feita quanto aos valores de temperatura medidos em locais de acesso. Gráficos de comparação entre os valores estimados e experimentais de temperatura são apresentados no Capítulo 5.

## **1.2 Desenvolvimento do Trabalho**

No Capítulo 2, encontra-se uma revisão bibliográfica dos elementos chaves do trabalho. A usinagem é exposta como o processo a ser avaliado. Com tantas operações possíveis na usinagem, como furação, fresamento, retificação, outros, foca-se quanto ao torneamento. A física envolvida no torneamento é indicada para maior compreensão do processo. Expõem-se componentes chaves que atuam no processo, como a ferramenta de corte e o suporte da ferramenta. É introduzida a relevância da ferramenta e quais aspectos afetam seu desgaste, sendo a temperatura de corte o aspecto particularmente avaliado. São evidenciadas as dificuldades quanto à obtenção das temperaturas desenvolvidas no torneamento. Também são

expostas as técnicas de medição da temperatura e também algumas técnicas usadas para sua estimação.

No Capítulo 3 é indicada a modelagem térmica do torneamento. Os componentes avaliados foram: a ferramenta de corte, o calço e o porta-ferramentas. Para cada um desses componentes foi atribuído um material específico, o calço e o porta-ferramentas sendo de aço ABNT 4340 e a ferramenta de corte sendo de metal duro. Para cada material foram indicadas suas respectivas propriedades térmicas. As simplificações usadas no trabalho são indicadas. Após introdução dos materiais e suas propriedades o modelo térmico é implementado, sendo esse dividido em duas subseções, uma do problema direto e a outra do problema inverso. Define-se cada problema inverso abordado no trabalho. A solução numérica associada ao software COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> é indicada.

O Capítulo 4 é usado para expor o procedimento experimental. Cada componente usado na experimentação foi indicado. Foram expostos os modelos dos aparelhos e também alguns detalhes de preparo dos sensores de medição. Aborda-se o processamento do sinal dos sensores e a medição da área desgastada da ferramenta.

Os resultados são apresentados no Capítulo 5. Expõem-se as estimações de temperatura e fluxo de calor associadas às medições feitas pelo termopar. Uma rápida comparação é feita entre as técnicas inversas Função Especificada Não Linear e Regularização de Viagem no Tempo. O fluxo de calor e as temperaturas estimadas para o caso onde se usou a câmera térmica são apresentados. Durante as explicações foram indicadas diferenças entre valores estimados e experimentais, além disso, ressaltou-se algumas diferenças entre os métodos de medição de temperatura.

As conclusões são apresentadas no Capítulo 6 junto com algumas sugestões de trabalhos futuros.

### **1.3 Objetivo**

Abordar o problema inverso junto ao problema direto permite a estimação do fluxo de calor e de temperaturas desenvolvidas no contato cavaco-ferramenta. As técnicas inversas usadas neste trabalho envolvem a minimização das diferenças entre temperaturas experimentais e estimadas. Para medir as temperaturas, dois meios são usados: termopares e termovisor. O objetivo essencial do trabalho era evidenciar as diferenças de estimações entre esses dois meios de medição de temperatura.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Usinagem

O desgaste da ferramenta é um fator que impacta bastante na produção de uma peça adequada. Dentre as causas que influenciam o desgaste, podem ser pontuadas o material da ferramenta e o da peça usinada, os parâmetros de corte, as temperaturas desenvolvidas e a geometria da ferramenta. Dessas causas de desgaste, foca-se neste trabalho nas temperaturas desenvolvidas durante a usinagem, mais precisamente, quanto ao comportamento térmico no contato cavaco-ferramenta.

A deformação plástica e o atrito envolvidos no corte são as principais causas da geração de calor na usinagem (COTTERELL *et al.*, 2013). O atrito atua em duas regiões da ferramenta, uma no flanco e a outra na superfície de saída. As evoluções dos coeficientes de atrito nessas regiões são diferentes.

Grzesik, Rech e Žak (2014) fizeram uma leitura das forças de corte e às passaram para um sistema de coordenadas com a face e flanco da ferramenta destacadas, o que permitiu calcular os coeficientes de atrito nestas áreas. A ferramenta usada foi a cerâmica  $\text{Si}_3\text{N}_4$  com revestimento de TiN. Em testes de desgaste, avaliaram a variação da força com a velocidade de corte. Os coeficientes de atrito, em velocidades de corte igual ou maiores que 160 m/min, mantiveram uma tendência de aumento com a contínua usinagem. Esses coeficientes, em corte oblíquo, diferem-se daqueles determinados para o modelo ortogonal, diferença esta que diminui com o desgaste das ferramentas. Ainda, perceberam que os valores dos coeficientes de atrito no flanco e na superfície de saída da ferramenta eram praticamente iguais no início da usinagem, mas apresentavam divergência substancial com o progresso do desgaste.

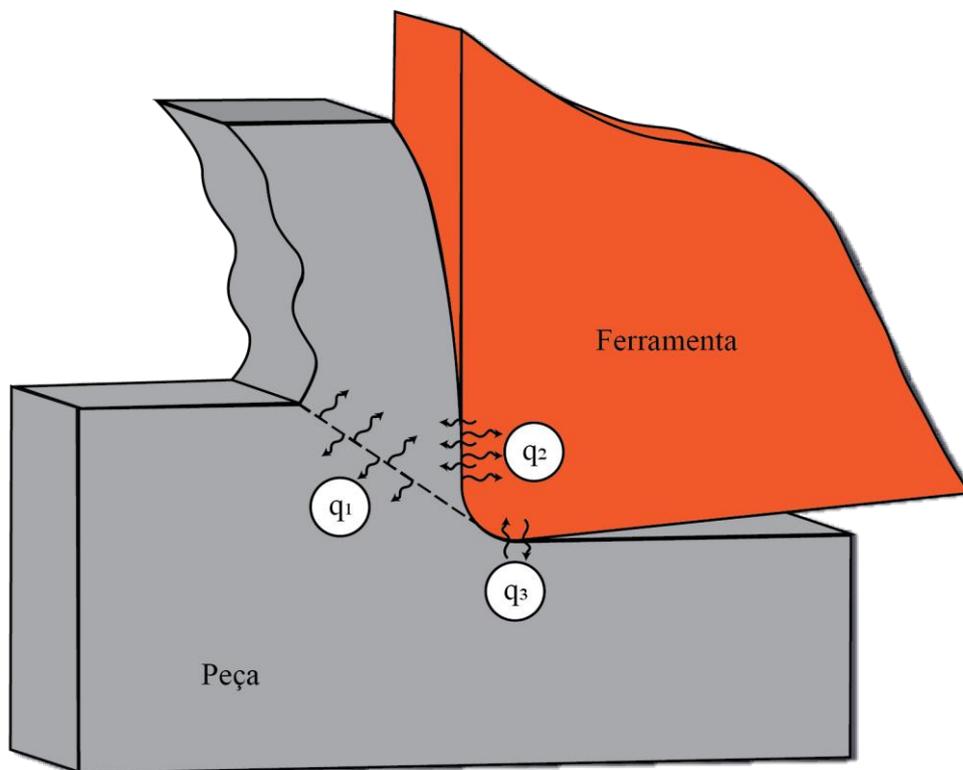
Na Figura 2.1 são indicadas três fontes de calor na região de corte durante torneamento. As fontes são  $q_1$ , gerada pela deformação plástica no plano de cisalhamento,  $q_2$ , causada por fricção do contato cavaco-ferramenta e  $q_3$  de origem da fricção entre peça e flanco da ferramenta.

As temperaturas de corte são difíceis de medir precisamente. Não há um dispositivo capaz de medir as temperaturas desenvolvidas na região de corte como o dinamômetro existe para medição de forças, mas existe uma grande quantia de técnicas desenvolvidas para estipulá-las (STEPHENSON e AGAPIOU, 2016).

Por mais que seja difícil a medição da temperatura no contato cavaco-ferramenta, sua compreensão é necessária. Durante a usinagem uma grande quantia de calor e altas temperaturas de centenas à acima de mil graus Celsius são gerada no contato cavaco-

ferramenta (GRZESIK, 2017). Essas temperaturas têm uma influência importante no desgaste da ferramenta. Prasad, Prabha e Kumar (2017) desenvolveram um método para monitorar em tempo real o desgaste de ferramentas de metal duro revestidas e não revestidas. Usaram na configuração experimental sensores de vibração e câmera térmica. Constataram que as temperaturas de corte aumentavam gradualmente com o desgaste da ferramenta, e que essa tendência era mais notável no caso de ferramentas não revestidas. Os resultados indicaram a viabilidade de usar a temperatura de corte para monitorar torneamento em alta velocidade. O monitoramento em tempo real pode minimizar ou eliminar consequências do desgaste da ferramenta.

Figura 2.1 - Fontes de geração de calor no torneamento.



Fonte: O próprio autor.

A usinagem pode envolver muitos campos de pesquisa. Focar em algum desses campos pode adicionar quanto à compreensão da usinagem. Um exemplo para explorar neste processo é a transferência de calor entre superfícies, a qual ajuda a entender como o calor se desenvolve entre a ferramenta e o suporte. Outros exemplos que também podem ser explorados, mas esses com trabalhos já existentes na usinagem envolvem a influência do aquecimento da peça usinada, ou mesmo a influência do material da ferramenta.

Xian *et al.* (2018) apresentaram uma revisão de métodos experimentais comumente usados para caracterizar problemas de resistência de contato (RC). As medições estacionárias

são bem conhecidas no campo de RC, apontadas como relativamente simples e confiáveis. Os métodos transientes, apesar de muito rápidos em resposta, não são tão precisos quanto os métodos em regime permanente. Um dos motivos para essa falta de precisão é relacionado ao arranjo experimental, o qual pode adicionar fatores desconhecidos no cálculo das propriedades termofísicas.

Parida e Maity (2019) investigaram os efeitos do aquecimento da peça usinada durante operação de usinagem. A peça usinada foi o Inconel 718, as ferramentas eram de metal duro não revestido e o método de aquecimento foi o por chamas a base de oxigênio e gás. Por análises numéricas e experimentais concluíram que aquecer a peça resultou em uma redução das forças de corte (revelando a redução da resistência ao cisalhamento do Inconel 718) e em um conseqüente alongamento do cavaco que de segmentado passou a ser contínuo. Em complemento avaliaram certas influências dos parâmetros de corte. As forças de corte diminuíram com o aumento da velocidade de corte de 66 para 188 m/min, considerando avanço constante. Um aumento do avanço com velocidade de corte constante levou ao aumento da força de corte.

Vajdi *et al.* (2020) fizeram uma revisão sobre aplicações de transferência de calor em cerâmicas avançadas. Expuseram resultados de várias simulações feitas no software COMSOL para demonstrar seu potencial em fornecer resultados confiáveis. Um dos tópicos revisados era sobre a aplicação de cerâmicas na usinagem. Indicaram quanto à capacidade das simulações numéricas de acessarem pontos que são difíceis de acessar experimentalmente.

## 2.2 Temperatura de corte

Alguns dos vários parâmetros que afetam a temperatura de corte são: o uso ou não de ferramenta revestida e parâmetros de usinagem.

Grzesik, Niesłony e Bartoszek (2009) abordaram típicos métodos de modelagem no estudo térmico da zona de corte. Foram usadas ferramentas de metal duro com diferentes revestimentos. Determinaram experimentalmente as propriedades termofísicas da peça usinada e das ferramentas testadas. A ferramenta com múltiplas camadas de revestimento foi tratada como uma camada de compósito com propriedades termofísicas equivalentes. Avaliaram três tipos de métodos: analítico, Método dos Elementos Finitos (MEF) e Método das Diferenças Finitas (MDF). O modelo analítico previu adequadamente os valores médios de temperatura desenvolvidos em dois tipos de ferramentas: não revestidas e com três camadas de revestimento. Para o MEF indicaram ser importante definir os modelos constitutivos do material da peça e da ferramenta. O MDF foi visto como capaz de apontar

corretas simulações de distribuição de temperatura de forma simples e rápida. Mesmo com as avaliações feitas, não foi possível apresentar um método ótimo para as análises térmicas na zona de corte.

O uso do revestimento na ferramenta é visto como benéfico para a usinagem, o qual asseguraria melhores características de dissipação de calor. Por planejamento de experimentos, Sivaramakrishnaiah, Kumar e Janardana (2017) avaliaram a influência dos parâmetros de corte na temperatura desenvolvida durante usinagem, nas forças de corte, e na rugosidade da peça. As ferramentas usadas foram de metal duro sem revestimento e com revestimento de  $Al_2O_3$ . Constataram com o uso de ferramentas revestidas uma redução da rugosidade da peça, das forças de corte e das temperaturas de interface. A justificativa para menor temperatura desenvolvida com a ferramenta revestida poderia ser pelo deslizamento mais suave (com menor atrito) do cavaco na superfície de saída da ferramenta. Adicionalmente, eles pontuaram ser necessário monitorar de perto a região onde a temperatura de corte é medida, isso para garantir que os cavacos não atrapalhem as análises.

São muitas as técnicas para descobrir a temperatura na região de corte. Câmeras infravermelhas, termopares dos mais variados tipos e outros aparelhos são usados de apoio às técnicas de medição. Explorar as temperaturas desenvolvidas durante a usinagem são tão atrativas a pesquisadores que até mesmo ferramentas não aplicáveis industrialmente já foram usadas para descobrir o comportamento térmico, como as de granada de ítrio e alumínio. Os elementos sujeitos a análises de temperatura não se restringem às ferramentas de corte, o cavaco, por exemplo, também é usado. Além disso, há mesmo estudos que adicionam às análises o uso de fluidos refrigerantes.

Heigel *et al.* (2017) usaram ferramentas transparentes de granada de ítrio e alumínio na usinagem ortogonal da liga de titânio Ti-6Al-4V. Essas ferramentas não são relevantes no contexto industrial, mas permitiram a medição da temperatura no contato cavaco-ferramenta. Para medir a distribuição de temperatura no contato cavaco-ferramenta usaram uma câmera infravermelha. Também mediram as forças de corte envolvidas na usinagem e gravaram vídeos sobre a curvatura do cavaco e sua quebra. Alguns dos parâmetros de corte usados foram: avanço de  $50 \mu\text{m}/\text{rev}$  e velocidades de corte entre  $20 \text{ m}/\text{min}$  e  $100 \text{ m}/\text{min}$ . Análises a partir da zona de corte mostraram uma diferença de temperatura de 6% a 21% de um lado ao outro do cavaco. Essa variação na medida indica que deve-se ter cautela ao fazer medições de temperatura de um cavaco, pois reflexos da superfície livre do cavaco fazem ele parecer artificialmente mais quente. Como os autores acessaram uma região normalmente inviável, seus resultados servem de comparação para outros modelos que descrevem temperaturas no contato cavaco-ferramenta.

Möhring *et al.* (2018) usaram uma abordagem analítica e numérica. Foi considerada nas análises a consequente diminuição de dureza do material usinado com a elevação da temperatura de corte. Os modelos propostos foram verificados experimentalmente. Notaram que com aumento de velocidade de corte, a temperatura na superfície de saída da ferramenta seria maior.

Soler *et al.* (2018) apresentaram um novo método para a coleta das temperaturas na superfície de saída da ferramenta. Os autores abordaram a usinagem ortogonal da peça AISI 4140, onde as medições de temperatura foram feitas por câmera infravermelha. Usaram uma nova técnica para calibração da câmera que dispensava a correção de emissividade para obtenção das temperaturas. Por fim fizeram correlações entre as temperaturas e as forças de corte. Foi pontuada uma eficiência da configuração experimental para mostrar as distribuições de temperatura na superfície de saída. Como melhoria no processo de calibração, indicaram que seria necessário um aquecimento mais uniforme da ferramenta. Soler *et al.* (2018) observaram quanto a melhorias na usinagem, que o aumento de diâmetro da peça e maior taxa de quadros da câmera proporcionariam uma extrapolação para estimar a temperatura da ferramenta enquanto em contato com o cavaco.

Kovac *et al.* (2019), através de medições de temperatura e análises de desgaste da ferramenta, trabalharam em uma extensão da relação funcional de Taylor para predição da vida da ferramenta. A obtenção das temperaturas foi feita com termopar adaptado para operação de fresamento facial. Kovac *et al.* (2019) usaram o termopar por apontarem seu baixo custo e praticidade de uso. Para formação do modelo de predição os autores tomaram como premissa a relação entre desgaste da ferramenta e temperatura de corte. Os resultados experimentais mostraram boa capacidade do modelo quanto a predizer as leituras do termopar, mas não conclusivos quanto à capacidade de prever a vida da ferramenta.

Weng *et al.* (2019) desenvolveram um modelo analítico para predizer as distribuições de temperatura no cavaco, ferramenta e peça. Abordaram a usinagem oblíqua de Inconel 718 por ferramenta redonda. Duas fontes de calor foram consideradas, uma sendo o plano de cisalhamento e a outra como a interface cavaco-ferramenta. Como a ferramenta usada era redonda, essas fontes de calor não teriam o formato retangular comumente conhecido, por isso a discretização delas foi indispensável. A obtenção do aumento total de temperatura causado por cada fonte foi feito integrando a contribuição na temperatura de cada incremento. Os resultados calculados analiticamente foram validados por dados experimentais e dados de simulações numéricas.

Su *et al.* (2020) analisaram a evolução da temperatura no cavaco e na interface peça-ferramenta-cavaco enquanto aumentavam a velocidade de corte. Su *et al.* (2020) exploraram a velocidade de corte partindo de um valor baixo (100 m/min) e aumentando até um valor bem elevado (7000 m/min). A evolução das temperaturas foi apresentada com base em uma tática semiquantitativa, onde características do cavaco como sua coloração foram consideradas para avaliar qual seria a temperatura. O aumento da velocidade de corte provoca variações na forma do cavaco e nas propriedades mecânicas do material usinado. Essa questão foi levada em consideração pelos autores; pretendiam saber como essas variações afetam o aumento e a distribuição das temperaturas de corte. Dentre as conclusões, uma que chama a atenção é quanto à posição do ponto de maior temperatura na ferramenta, o qual foi dito se deslocar com o aumento da velocidade de corte. O ponto se desloca da superfície de saída para a ponta de corte e finalmente para o flanco da ferramenta.

Rezende, Magalhães e Rubio (2020) focaram na predição de temperatura em torneamento através da modificação do modelo de Gottwein. Pelas modificações propuseram duas novas equações, uma considerando os efeitos do avanço (Modelo de avanço) e outra considerando a condutividade térmica (Modelo com  $k_{eq}$ ), nesse último modelo sendo usado o conceito de condutividade térmica equivalente ( $k_{eq}$ ). Esses dois parâmetros constituindo os diferentes modelos anteriores fazem parte dos parâmetros que mostraram maior influência na análise de variância (ANOVA). Dentre os dados para a ANOVA estão as medidas de temperatura do cavaco na direção circunferencial. O processo analisado foi o torneamento a seco usando ferramentas de metal duro revestido e não revestido. Várias condições de corte foram exploradas na ANOVA. Os autores apontaram que o uso de  $k_{eq}$  permitiu uma diminuição dos erros entre os valores experimentais e os valores obtidos pelo método de predição. Também constataram menores temperaturas quando usada uma ferramenta com multicamadas de revestimento, atribuíram isso à sua menor  $k_{eq}$ .

Wang *et al.* (2020) desenvolveram um método analítico para obter as distribuições de temperatura na região de corte. Abordaram usinagem ortogonal com auxílio de jateamento criogênico. Foram considerados no modelo térmico os três fatores seguintes: a deformação por cisalhamento na zona primária, o atrito na interface cavaco-ferramenta e as perdas de calor nas superfícies da ferramenta. A perda de calor na ferramenta foi considerada por suas superfícies sofrerem o jateamento de nitrogênio líquido (LN<sub>2</sub>). Na superfície de saída da ferramenta a perda de calor foi dividida em zona de contato e zona de não contato com cavaco para calcular os efeitos do resfriamento. Também consideraram a perda de calor na peça usinada pelo LN<sub>2</sub> agindo no espaçamento entre o flanco da ferramenta e a peça. Foi feito um experimento de usinagem usando como peça a liga Ti-6Al-4V para comprovar o desempenho

do modelo analítico. O erro de predição médio foi menor do que 3,3% e o maior erro de 6,7%, valores que indicaram o modelo como aceitável para predições de temperatura no caso estudado.

## 2.3 Técnicas inversas aplicadas na usinagem

Uma das possíveis abordagens para compreender o comportamento térmico no contato cavaco-ferramenta é o uso de técnicas de problemas inversos. Os problemas inversos em condução de calor são baseados em estimar o fluxo de calor em regiões de difícil acesso, através de uma ou mais temperaturas medidas em regiões mais fáceis de acessar. Esse julgar algo fácil ou não de se acessar está associado à física do processo impedir o posicionamento de sensores ou pelos sensores afetaram a região de medida. (BECK; BLACKWELL; CLAIR, 1985).

Na Figura 2.2 apresenta-se um esquema de distinção entre problemas inversos e diretos. Do fluxo de calor para calcular a temperatura, tem-se o problema direto e da temperatura para estimar o fluxo de calor, tem-se o problema inverso.

Figura 2.2 - Distinção entre problema direto e inverso, considerando o contexto do trabalho.



Fonte: O próprio autor.

Brito, Carvalho e Lima e Silva (2015) usaram a Função Especificada como técnica inversa para determinar o comportamento térmico no contato peça-ferramenta durante a usinagem. O COMSOL foi usado de apoio para as simulações. Foi levado em consideração o caráter transiente do problema. Por comparações entre respostas numéricas e experimentais, percebeu-se que o modelo usado foi eficiente para estimar as temperaturas. Também foi constatado o quanto, em um curto espaço dimensional, a ferramenta pode apresentar temperaturas tão distintas.

Ferreira *et al.* (2018), usando o COMSOL e abordando um problema inverso não linear, também investigaram as temperaturas na zona de corte. Acrescentaram análises sobre os efeitos dos revestimentos de Nitreto de Titânio (TiN) e Óxido de Alumínio ( $Al_2O_3$ ) no comportamento térmico. Observaram uma eficiência destes dois revestimentos em diminuir a dissipação do calor, o que protege o substrato da ferramenta. Com a menor dissipação, têm-se temperaturas mais elevadas no contato peça-ferramenta. Esse comportamento se intensifica quanto maior a espessura do revestimento.

Huang *et al.* (2018a) estimaram em tempo real o fluxo de calor na interface cavaco-ferramenta baseando-se na solução de um problema inverso de condução de calor. Usaram o método de regularização sequencial de Tikhonov para resolver o problema inverso. Consideraram o fluxo de calor não uniformemente distribuído e variando com tempo. As temperaturas foram obtidas por termopares de película fina colocados em micro-canais na superfície de saída da ferramenta. Os coeficientes de sensibilidade, necessários para o uso do método de regularização sequencial, foram obtidos com resolução do problema direto. O problema direto de condução de calor foi resolvido pelo método dos Elementos Finitos. Huang *et al.* (2018a) constataram que o algoritmo proposto pode determinar em tempo real a distribuição e a variação do fluxo de calor.

Huang *et al.* (2018b) analisaram a distribuição de temperatura na interface cavaco-ferramenta em torneamento através de uma técnica inversa on-line. Termopares foram posicionados em regiões acessíveis na ferramenta para medição das temperaturas. O método de Regularização de Tikhonov foi usado para resolver o problema inverso de condução de calor, determinando assim o fluxo de calor transiente imposto na interface cavaco-ferramenta. Com o fluxo conhecido o campo de temperatura na interface foi computado resolvendo um modelo térmico não linear e 3D. Para aumentar a eficiência de resolução do modelo térmico foi usado um método que combinava o teorema de superposição de Duhamel com o método dos Elementos Finitos. Análises numéricas e experimentais com usinagem da liga de titânio Ti-6Al-4V foram feitas para validar o procedimento proposto. O procedimento de cálculo mostrou ser eficiente para aplicações on-line devido ao seu desempenho computacional e sua independência de medições futuras.

Oliveira, Ribeiro e Guimarães (2021) analisaram o efeito do revestimento em ferramentas de corte. A ideia seria avaliar o quanto o revestimento protege o substrato contra as altas temperaturas desenvolvidas na usinagem. Oliveira, Ribeiro e Guimarães (2021) usaram uma solução analítica para o problema térmico transiente e tridimensional (3D) capaz de modelar um processo de usinagem ortogonal com ferramenta revestida. A função de Green

baseada em funções de transferência (TFBGF), uma técnica inversa, foi usada para o cálculo do fluxo de calor gerado no contato peça-ferramenta-cavaco. Com o fluxo de calor conhecido, aplicaram o modelo analítico baseado nas funções de Green, para o cálculo do campo de temperatura na ferramenta.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Descrição do problema

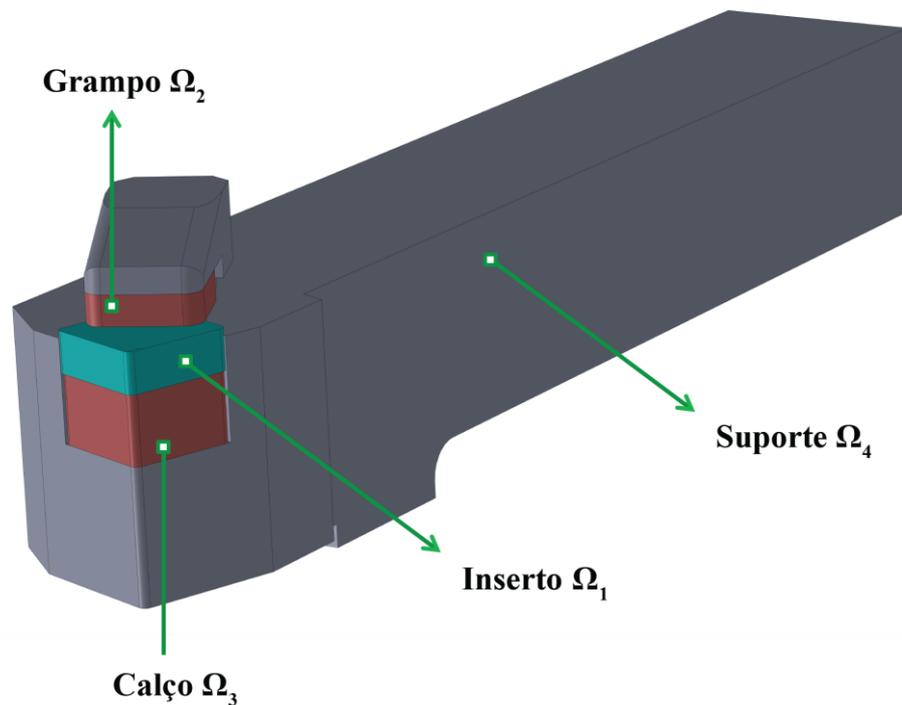
O foco do estudo é no processo de torneamento. Para compreender o comportamento térmico na interface cavaco-ferramenta, foram considerados quatro componentes: ferramenta de metal duro, calço, grampo e porta-ferramentas. Esses componentes foram desenhados numericamente um a um, e em seguida montados. A montagem final foi à usada durante as simulações.

A ferramenta de metal duro é o elemento principal de análise. Ele é montado acima do calço e fixado no conjunto após aperto de parafuso. O porta-ferramentas contém esse parafuso e todo um sistemas de fixação para manter a ferramenta bem posicionada durante a usinagem. Esse sistema pressiona o grampo sobre a superfície superior da ferramenta. A dimensão desses componentes, como a dos outros foi estabelecida de acordo com as dimensões reais usadas no experimento. As geometrias representadas numericamente não são exatamente como as experimentais, o intuito era simplificar a simulação para diminuir erros de solução. O porta-ferramentas foi o componente mais simplificado, além disso, seus fragmentos usados para fixação como parafuso, grampo e outros foram construídos acoplados uns aos outros, assim constituindo uma única peça.

Na Figura 3.1 está representada a montagem usada nas simulações numéricas. Em verde percebe-se a ferramenta e em vermelho os elementos que posicionam a ferramenta adequadamente no suporte (em cinza).

Devido à abordagem numérica, é de extrema valia fazer uma divisão dos domínios. O método dos elementos finitos (MEF) será usado na solução do problema. O MEF resolve as equações da física do problema justamente pela discretização desses domínios em elementos de formatos pré-selecionados. Um papel simplificador em separar o modelo em domínios é quanto à associação dos materiais. A ferramenta, o grampo, o calço e o porta-ferramentas foram cada um considerados como um domínio. Essas distinções facilitam durante a simulação à atribuição dos materiais respectivos desses quatro. Os domínios considerados podem ser vistos também na Figura 3.1. Sendo  $\Omega$  a representação de domínio, foram considerados: ferramenta de metal duro como  $\Omega_1$ , grampo sendo  $\Omega_2$ , calço como  $\Omega_3$  e porta-ferramentas como  $\Omega_4$ .

Figura 3.1- Montagem usada para as simulações numéricas.



Fonte: Próprio Autor.

## 3.2 Propriedades Térmicas

Duas propriedades importantes para as análises térmicas neste trabalho são o calor específico e a condutividade térmica. Essas propriedades foram assumidas variáveis com a temperatura. Saber o que essas propriedades indicam fisicamente pode ajudar na compreensão dos gráficos expostos nesta seção.

Um material sólido, quando esquentado, tem sua temperatura aumentada. Esse aumento de temperatura significa que energia está sendo absorvida. Capacidade térmica é uma propriedade que indica a habilidade do material em absorver calor de suas fronteiras. Essa propriedade indica a quantia de energia necessária para aumentar uma unidade de temperatura no material. A questão é que abordá-la sozinha não seria tão conveniente, pois essa teria valores diferentes dependendo da quantia de matéria. Nesse contexto chega-se à ideia de calor específico, o qual é a capacidade térmica por unidade de massa do material.

Quando perceber nas propriedades térmicas um aumento de valor do calor específico, entenda esse como uma necessidade de mais calor para esquentar o material. Isso considerando mesma variação de temperatura e mesma quantia de matéria.

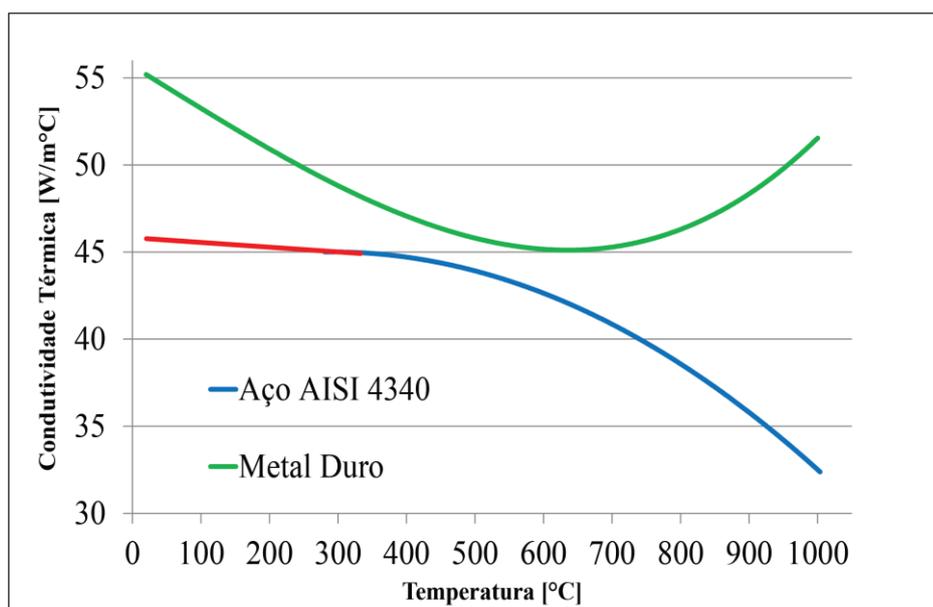
A condução térmica é um fenômeno no qual o calor é transportado de uma região de alta temperatura para uma região de baixa temperatura. O calor é transportado em materiais sólidos tanto por elétrons livres quanto por fônons; fônon é um quantum de energia elástica, a qual se propaga pela rede cristalina do sólido. Normalmente os metais têm predominantemente a transferência de calor feita por elétrons livres, enquanto materiais não metálicos, como a cerâmica, predominam na transferência de calor por fônons. A condutividade térmica é uma propriedade associada a esses mecanismos de transferência de calor. Ela diz qual é a habilidade do material para transferir esse calor por condução.

Pelo exposto, entende-se que um aumento da condutividade térmica em gráfico pela temperatura representaria uma maior capacidade do material em transferir calor.

As propriedades dos domínios do modelo foram obtidas por trabalhos de outros autores. A densidade de cada material foi admitida como constante, mas a condutividade térmica e o calor específico à pressão constante foram considerados como dependentes da temperatura.

O metal duro foi o material considerado para o grampo, calço e ferramenta de corte. A condutividade e calor específico do metal duro foram coletados da fonte Jiang, Zhang e Yan (2016). O suporte da ferramenta foi considerado como sendo de aço ABNT 4340, tanto a condutividade térmica quanto o calor específico desse material foram coletados da fonte Fakir, Barka e Brousseau (2018). Na Figura 3.2 pode-se perceber a condutividade térmica variando com a temperatura tanto para o metal duro, quanto para o aço ABNT 4340. A linha vermelha representa uma extrapolação linear para a respectiva curva em que ela está acoplada.

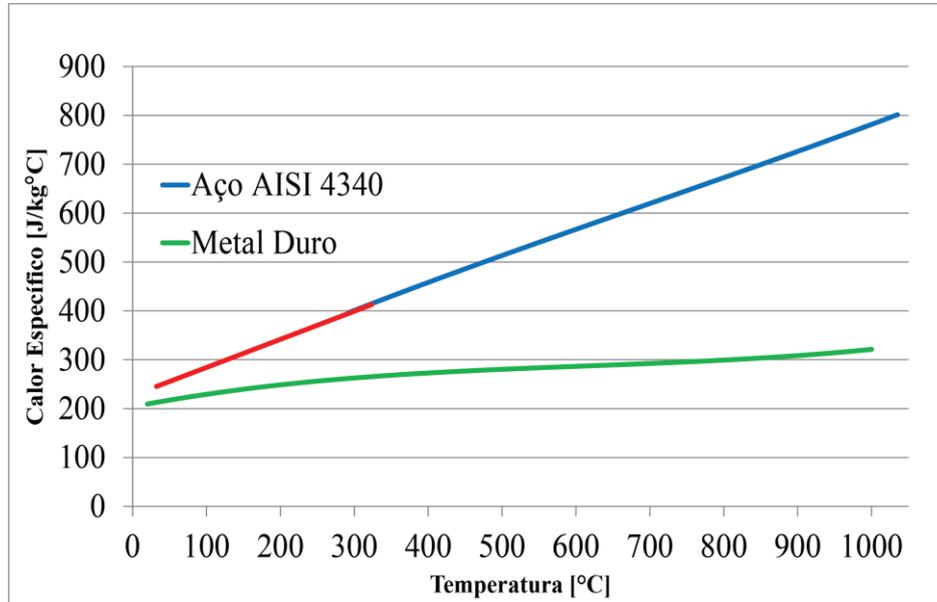
Figura 3.2 - Condutividade térmica do aço ABNT 4340 e do metal duro.



Fonte: Jiang, Zhang e Yan (2016) e Fakir, Barka e Brousseau (2018).

As propriedades do calor específico variando com a temperatura para o metal duro e também para o aço ABNT 4340 podem ser notadas na Figura 3.3. Novamente, a linha vermelha representa uma extrapolação linear para a curva à qual está associada.

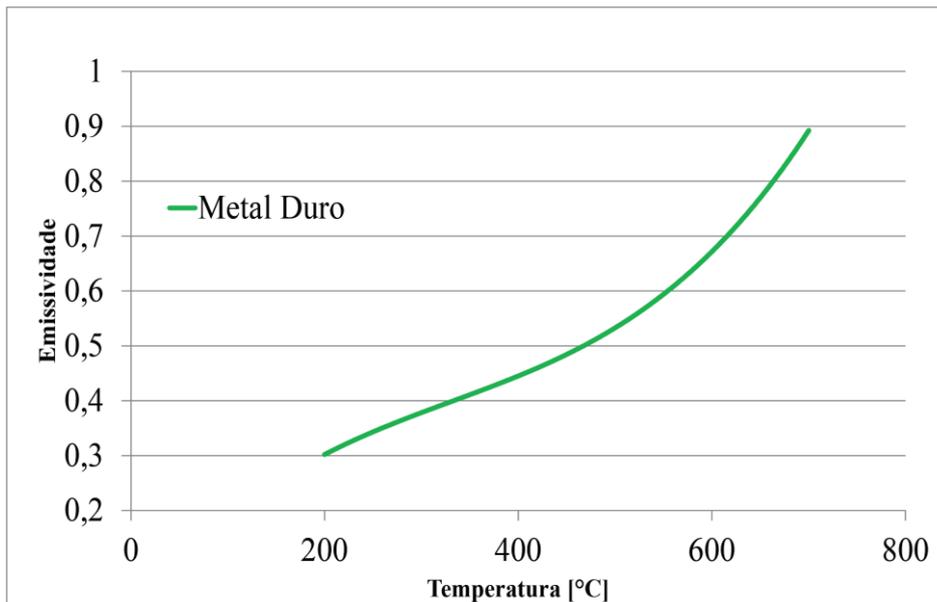
Figura 3.3 - Calor específico do aço ABNT 4340 e do metal duro.



Fonte: Jiang, Zhang e Yan (2016) e Fakir, Barka e Brousseau (2018).

Sendo a radiação térmica considerada, foi necessária a atribuição da radiação às superfícies dos domínios do modelo. Para o metal duro, além das propriedades já coletadas de Jiang, Zhang e Yan (2016), essa fonte foi novamente usada para obter as emissividades. As variações da emissividade com a temperatura podem ser percebidas na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Emissividade do metal duro variando com a temperatura.



Fonte: Jiang, Zhang e Yan (2016).

A emissividade do aço ABNT 4340 foi considerada constante,  $\varepsilon = 0,85$ . As densidades do aço ABNT 4340 e do metal duro estão expostas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Propriedades consideradas constantes.

Material	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Aço ABNT 4340	7850
Metal Duro	14100

Fontes: Jomaa, Songmene e Bocher (2015) e Jiang, Zhang e Yan (2016).

Algumas simplificações foram aplicadas no modelo. O contato térmico entre todos os componentes foi assumido como perfeito, logo a rugosidade desses não foi considerada. Devido a essa consideração do contato térmico, a resistência térmica de contato (RTC) não foi abordada. Não há geração interna de calor seja na ferramenta, grampo, calço ou porta-ferramentas. Por fim, a temperatura ambiente foi assumida como constante.

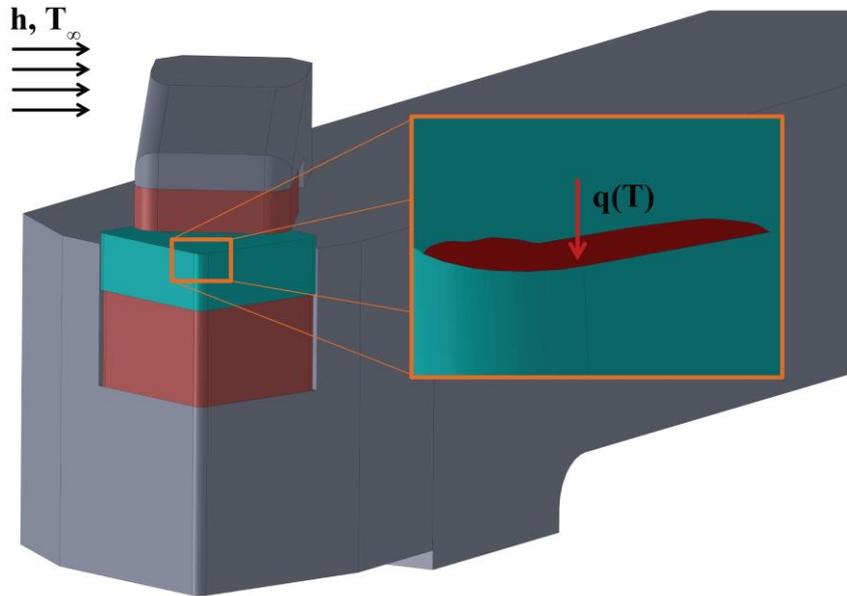
### 3.3 Modelo Térmico

A resolução do modelo térmico pode ser dividida entre duas etapas. Em uma delas atua as técnicas inversas. Nessa etapa o fluxo de calor no contato cavaco-ferramenta é estimado através de temperaturas experimentais. Essas temperaturas foram medidas em locais acessíveis, durante a usinagem. A outra etapa de solução se refere ao problema direto. No problema direto, os fluxos de calor estimados pela técnica inversa são usados na obtenção das temperaturas. Assim, com a aplicação das duas etapas, têm-se as temperaturas desenvolvidas no contato cavaco-ferramenta e no modelo em geral.

### 3.4 Problema Direto

O modelo térmico na montagem calço, grampo, ferramenta de corte e porta-ferramentas é representado na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Modelo térmico do problema abordado.



Fonte: O próprio autor.

O modelo térmico é descrito pela equação da difusão de calor tridimensional em regime transiente. A equação também é considerada não-linear, com propriedades térmicas dos materiais sendo dependentes da temperatura. A equação da difusão de calor pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

$k$  é a condutividade térmica,  $\rho$  a densidade,  $c$  o calor específico,  $T$  a temperatura,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  sendo as coordenadas cartesianas, e  $t$  o tempo.

Os efeitos da convecção e radiação atuando nas superfícies dos domínios são abordados como uma condição de contorno:

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial \eta} = h(T - T_\infty) + \sigma \varepsilon(T)(T^4 - T_\infty^4) \quad (3.2)$$

$h$  é o coeficiente de convecção,  $T_\infty$  é a temperatura ambiente,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann e  $\varepsilon$  a emissividade.

Das configurações estabelecidas, todas as partes do modelo expostas ao ar foram consideradas sujeitas à convecção natural e à radiação. A temperatura ambiente foi adicionada de acordo com a medida experimentalmente e a pressão absoluta foi considerada igual a 1 atm.

Além dos efeitos da convecção e radiação, outra condição de contorno é a de fluxo de calor ( $q$ ) imposto na interface cavaco-ferramenta:

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial z} = q(t) \quad (3.3)$$

sendo a condição inicial adotada para todo o modelo:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (3.4)$$

## 3.5 Problema Inverso

### 3.5.1 Método da Função Especificada Não Linear

Função Especificada Não Linear ou Iterativa, do inglês *Nonlinear Function Specification Method* (NFSM), recebe esse nome porque envolve assumir um formato para a função que será estimada. A função estimada nesse trabalho será o fluxo de calor. Quanto ao método da Função Especificada Não Linear, os componentes do fluxo de calor são determinados individualmente em sequência ao invés de serem determinados todos de uma vez.

Antes de indicar o fluxo de calor ( $q$ ) é necessário expor qual formulação conduz a ele. Para a estimação de  $q$  será usada a função objetivo de mínimos quadrados. A soma dos quadrados ( $S$ ) sendo:

$$S = \sum_{i=1}^r (Y_{M+i-1} - T_{M+i-1})^2 \quad (3.5)$$

Nessa análise dos mínimos quadrados é feita a diferença entre as temperaturas medidas nos pontos acessíveis,  $Y$ , e essas mesmas temperaturas, só que agora estimadas,  $T$ . As temperaturas estimadas, no caso desse trabalho, são resultantes da simulação numérica pelo COMSOL. Tem-se  $r$  como o número de tempos futuros.

Com  $r > 1$ , o procedimento sequencial mais simples é assumir temporariamente uma quantia de fluxos de calor constantes em  $r$  instantes futuros. Os fluxos de calor anteriores ao instante  $M$ ,  $\hat{q}_1, \hat{q}_2, \dots, \hat{q}_{M-1}$  são considerados conhecidos. O intuito é compreender o fluxo de calor no instante  $M$ ,  $q_M$ . Com a intenção de adicionar estabilidade ao algoritmo inverso, os fluxos de calor em  $r$  instantes futuros são considerados iguais (BECK, BLACKWELL e CLAIR, 1985):

$$q_{M+1} = q_{M+2} = \dots = q_{M+r-1} = q_M \quad (3.6)$$

Os tempos futuros são usados para regularização, assim, enquanto ainda se está na busca de um único componente de fluxo de calor  $q_M$ , o processo está considerando medidas futuras.

A aparição do fluxo de calor na função objetivo deve-se à temperatura estimada. Em uma abordagem linear, o formato dessa temperatura é baseado em uma aproximação numérica da integral de Duhamel, a qual introduz o termo de fluxo de calor.

Com uma posterior diferenciação da Eq. (3.5) com relação à  $q_M$  e a igualando à zero, se consegue a equação da Função Especificada Sequencial com regularização de tempos futuros:

$$\hat{q}_M = \frac{\sum_{i=1}^r \phi_i (Y_{M+i-1} - \hat{T}_{M+i-1})^2}{\sum_{i=1}^r \phi_i^2} \quad (3.7)$$

$\phi_i$  são respectivos aos coeficientes de sensibilidade. Os coeficientes de sensibilidade são iguais à primeira derivada da temperatura com relação ao fluxo de calor,  $\phi = \partial T / \partial q$  (BECK, BLACKWELL e CLAIR, 1985).

Considerando as propriedades térmicas dependentes da temperatura, o problema passa a ser não linear. No problema não linear, o princípio de superposição não pode ser empregado, então o somatório de Duhamel não pode ser usado.

As adequações para a abordagem não linear resultam em uma equação similar à Eq. (3.7):

$$\Delta q_M = \frac{\sum_{n=1}^r \chi_{qn} (Y_n - T_n)^2}{\sum_{n=1}^r \chi_{qn}^2} \quad (3.8)$$

sendo,

$$\chi_{qn} = \frac{\partial T_n}{\partial q_M} \quad (3.9)$$

as diferenças são quanto ao cálculo da temperatura ( $T$ ), o coeficiente de sensibilidade ( $X_q$ ) e  $q_M$ . Agora,  $q_M$  não é calculado diretamente, o analisado é uma correção desse  $q_M$  ( $\Delta q_M$ ). O subscrito  $q$  de  $X_q$  indica que o parâmetro desconhecido é apenas o  $q_M$ . Os coeficientes de sensibilidade podem ser encontrados resolvendo a equação da difusão de calor, condições de contorno e condição inicial com  $X_q$ .

Por Woodbury (2003) e Silva, Magalhães e Lima e Silva (2021), os passos para encontrar o fluxo de calor  $q_M$  em um problema não linear são:

1. Estipule um valor inicial para  $q_M$ ;
2. Resolva o problema direto encontrando as temperaturas  $T_n$ ;
3. Resolva as equações agora encontrando  $X_q$ ;
4. Use a Eq. (3.8) para calcular a correção  $\Delta q_M^{(i)}$ ;  $i$  de iteração;

5. Atinge convergência ou não? Um procedimento para assegurar convergência é fazer  $\Delta q_M^{(i)}/q_M \leq \delta$ , sendo  $\delta$  uma tolerância, nesse trabalho  $\delta = 0,001$ . Se a tolerância foi respeitada,  $q_M$  foi encontrado, do contrário atualize:

$$q_M^{(i+1)} = q_M^{(i)} + \Delta q_M^{(i)} \quad (3.10)$$

6. Volte ao passo 2. Repita o procedimento até que se alcance a convergência no passo 5.

### 3.5.2 Método da Regularização de Viagem no Tempo

Regularização de Viagem no Tempo, do inglês *Time Traveling Regularization* (TTR), é uma técnica que implementa à função objetivo, Eq. (3.5), uma regularização de tempos futuros. Esclarecendo, agora a função objetivo é minimizada com a presença de tempos futuros  $r$  (MAGALHÃES *et al.*, 2018):

$$F_{obj}^{jj} = \sum_{i_{TTR}=jj}^{jj+r} (Y^{jj+r} - T^{jj+r})^2 \quad (3.11)$$

com  $F_{obj}$  sendo a função objetivo e  $jj$  um contador do número de iterações.

A cada vez que a TTR é aplicada, o fluxo de calor é mantido constante em um intervalo de tempo até o  $r$  estipulado. Durante a TTR, o problema direto é o responsável por encontrar os valores de temperatura para o fluxo mantido constante.

Para a resolução do problema inverso, junto a essa abordagem da função objetivo utiliza-se o método da Seção Áurea. O método da Seção Áurea é usado para melhor escolher o fluxo de calor seguinte. A cada fluxo de calor encontrado, tinham-se as respectivas temperaturas estimadas, essas temperaturas eram alimentadas na função objetivo, Eq. (3.11). O valor dessa função era então avaliado com outro previamente estabelecido; dependendo do valor ser maior ou menor, o limite inferior ou superior era atualizado para uma próxima avaliação de funções objetivo.

## 3.6 Solução Numérica

Simulações numéricas são capazes de fornecer uma detalhada informação do comportamento físico em vários campos da engenharia. O *software* usado para as simulações numéricas foi o COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>. Esse *software* usa o método dos Elementos Finitos (MEF) para resolver as equações diferenciais parciais que governam o problema físico.

O método dos Elementos Finitos produz uma solução aproximada das equações diferenciais pela discretização do domínio. O MEF envolve os seguintes quatro passos para a solução de qualquer equação diferencial (ANTIA, 2012):

1. Particiona a região onde a solução é necessária em convenientes elementos. Por exemplo, em duas dimensões (2D) os elementos podem ser retangulares, triangulares ou triângulos e mesmo quadriláteros com lados curvos. A discretização é muito flexível e é ajustada para se adequar à região do problema. Deve-se evitar na discretização a presença de ângulos adjacentes pequenos ou muito obtusos, pois eles conduzem a problemas de cálculo;
2. Define as funções básicas que são diferentes de zero apenas nos fragmentos e zero em qualquer outro lugar. Essas funções básicas permitem uma aproximação por partes da solução;
3. Aplica o conceito das funções básicas na equação diferencial e obtém equações algébricas. Essa técnica é equivalente ao método de Galerkin aplicado nas equações diferenciais parciais;
4. Resolve o consequente sistema de equações algébricas.

Na problemática do trabalho, as seguintes configurações são aplicadas pelo COMSOL:

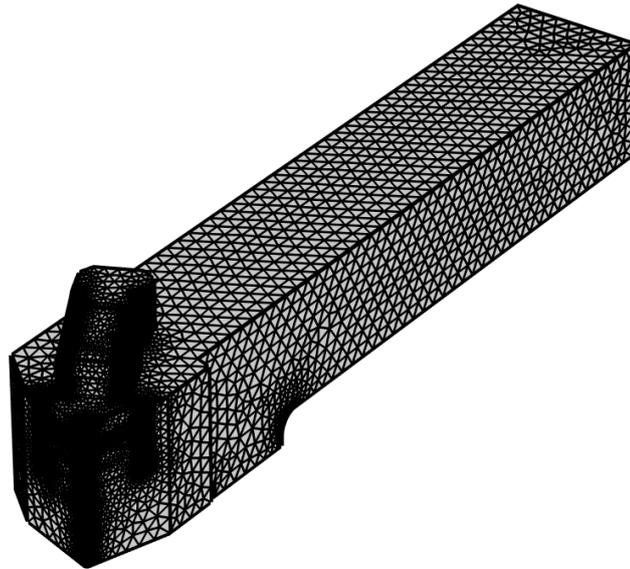
- Para a modelagem de transferência de calor em sólidos, as funções de forma usadas para a temperatura são quadráticas de Lagrange;
- O tempo é discretizado pelo método implícito *Backward Differentiation Formula* (BDF) e o problema é avaliado em intervalos de 0,5 s;
- Para encontrar os valores de temperatura foi utilizado o método *Generalized Minimum Residual* (GMRES).

Encontra-se na seguinte seção uma avaliação de possíveis malhas para o modelo tridimensional e conseqüentemente aquela que foi escolhida pra as análises neste trabalho.

### 3.7 Análise de Malhas

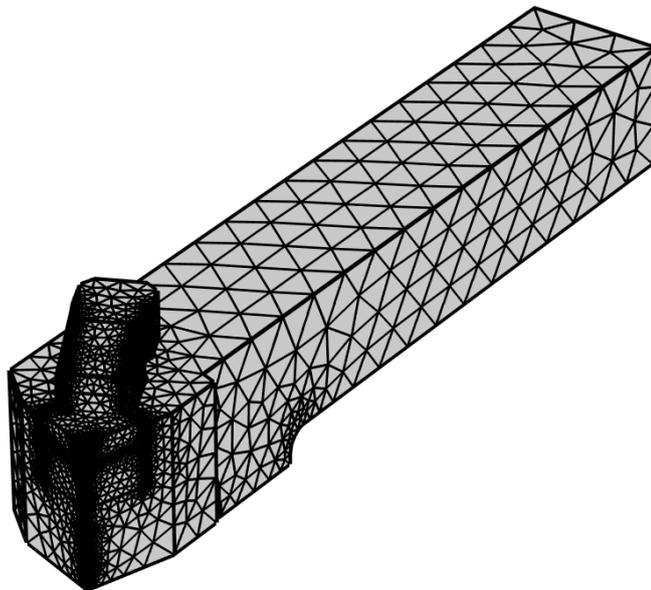
A malha usada no modelo numérico tem que estar adequada. Julgar uma malha adequada ou não está relacionado a encontrar a dimensão dos elementos de malha que irá assegurar uma acurácia das estimações. Essa acurácia é analisada quanto às estimações estarem dando valores aproximados independente das mudanças no tamanho da malha.

Figura 3.6 - Malha 1.



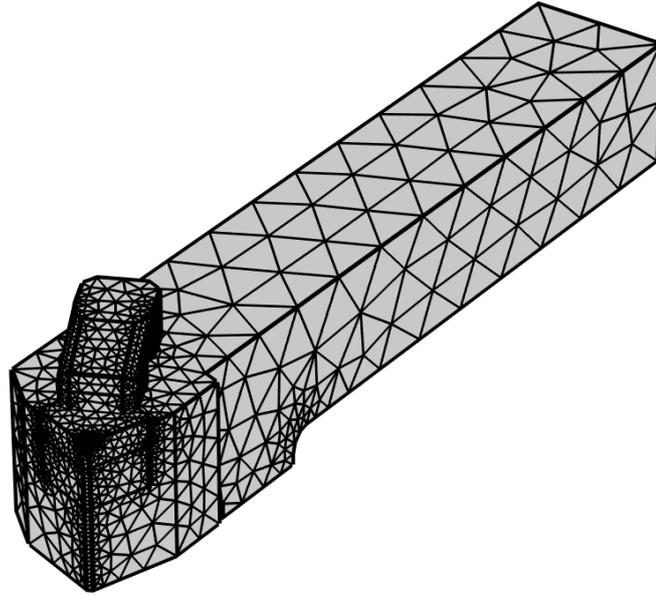
Fonte: O próprio autor.

Figura 3.7 - Malha 2.



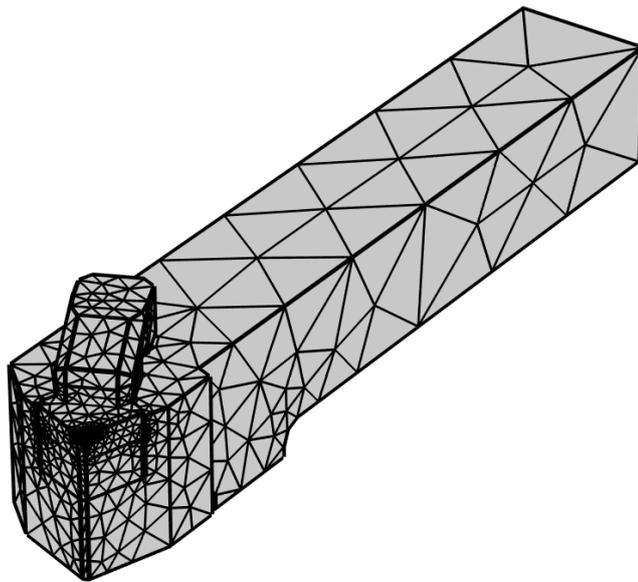
Fonte: O próprio autor.

Figura 3.8 - Malha 3.



Fonte: O próprio autor.

Figura 3.9 - Malha 4.



Fonte: O próprio autor.

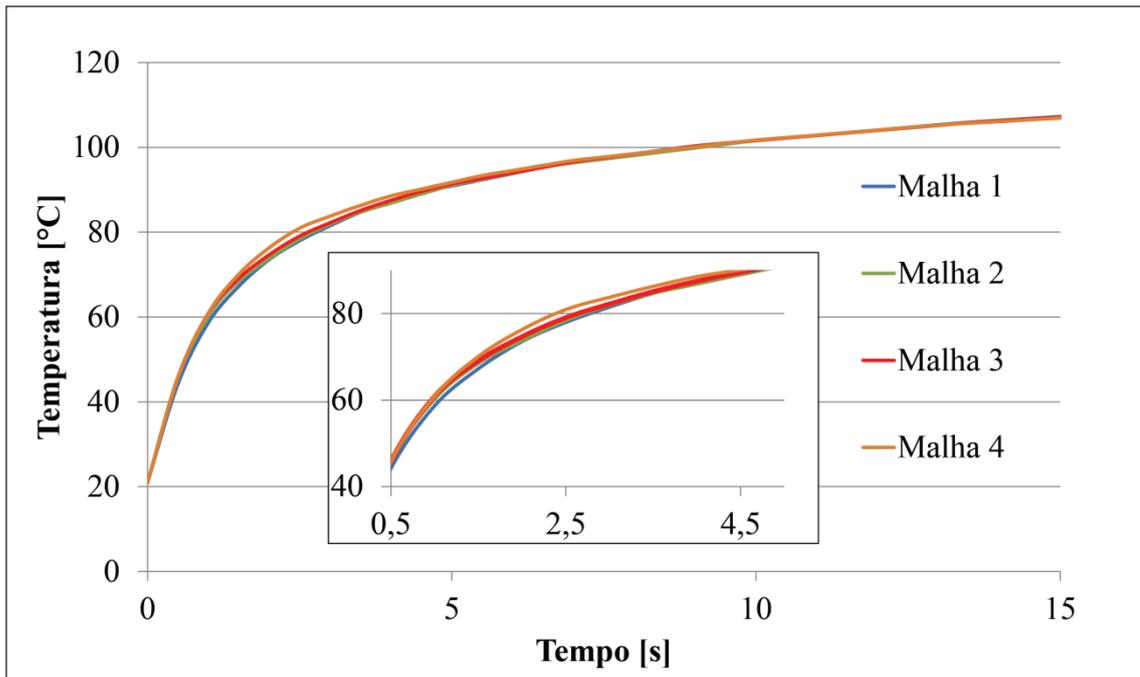
Tabela 3.2 - Características das malhas usadas.

Malha	Número de elementos tetraédricos	Qualidade média do elemento
1	355740	0,66
2	38017	0,66
3	14702	0,64
4	5921	0,61

Fonte: O próprio autor.

Com o aumento ou diminuição do tamanho das malhas foram avaliadas as variações nos valores de temperatura. O critério para escolha da malha foi optar por aquela que respeitasse uma convergência com as malhas mais refinadas. A análise dos valores estimados foi feita considerando o posicionamento de um termopar. Esse termopar foi aquele usado de referência para os problemas inversos. Na Figura 8.5 mostra-se essa análise de convergência entre as estimações de temperatura.

Figura 3.10 - Análise de convergência das temperaturas estimadas.



Fonte: O próprio autor.

Na Figura 8.5, destaca-se essencialmente o intervalo de tempo entre 0 e 15 segundos, isso porque a partir dos 15 segundos as malhas não apresentam variações significativas. Além disso, na Figura 8.5 há uma representação ampliada da área com maiores variações entre as malhas. Em um balanço entre o número de elementos tetraédricos e a convergência de temperatura optou-se por usar a Malha 3 nas simulações deste trabalho.

## 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

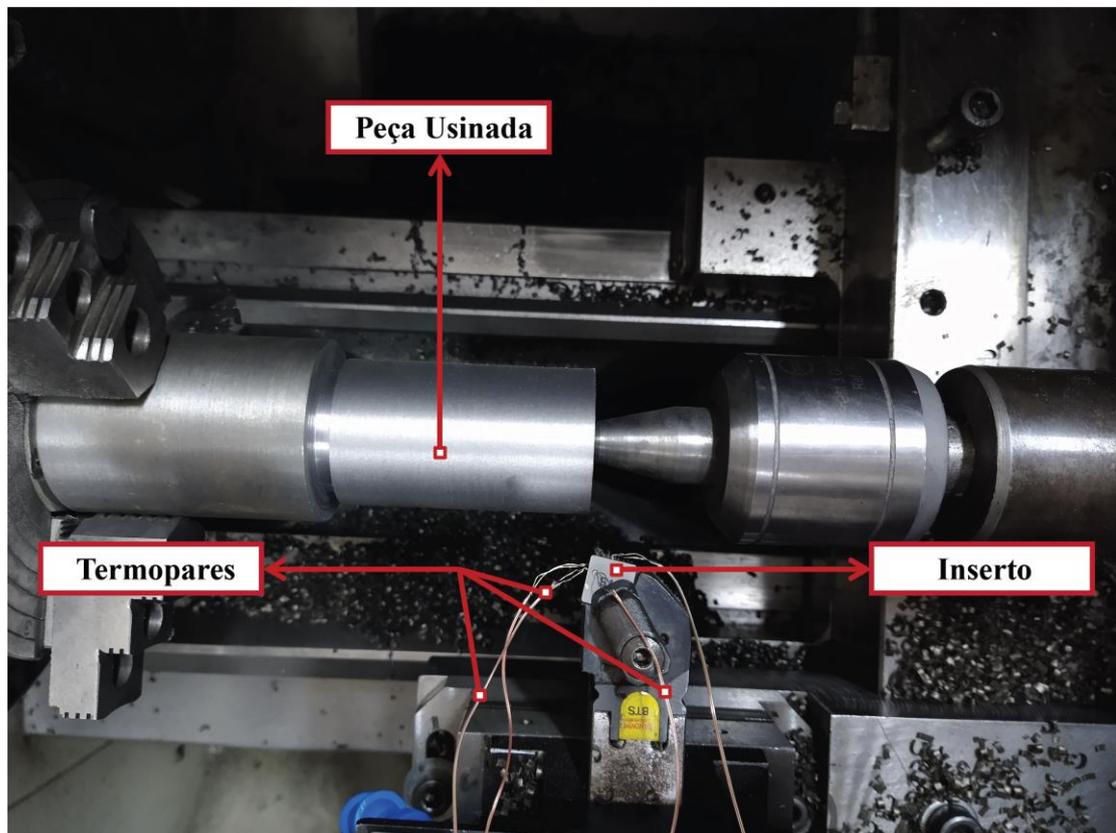
O processo de usinagem analisado neste trabalho é o torneamento. Na realização do experimento, foi usado o torno de modelo NARDINI Logic 175. A peça usada para usinagem foi um cilindro de ferro fundido nodular DIN GGG40, de acordo com a norma DIN, com dimensões: 50 mm de diâmetro e 135 mm de comprimento.

Para o corte do ferro fundido, usou-se uma ferramenta de metal duro ISO K10 sem cobertura de geometria ISO SNGN-120408. A ferramenta foi fixada no suporte por aperto de grampo. Por esse aperto e outras características considera-se o suporte usado como BT25-CSRNR-2540-12-IC.

A intenção durante o torneamento era conseguir medir temperaturas em regiões acessíveis da ferramenta. Para as medições de temperatura foram usados termopares do tipo K (Cromel-Alumel), Figura 4.1. Uma simples descrição de como esses sensores eram fixados:

1. Dois fios do termopar eram expostos e separados;
2. Uma descarga elétrica une esses dois fios;
3. Por fim, essa extremidade unida dos fios é soldada na ferramenta usando um equipamento de Descarga Capacitiva (ANSELMO, 2020).

Figura 4.1 - Representação dos termopares e elementos do torneamento.

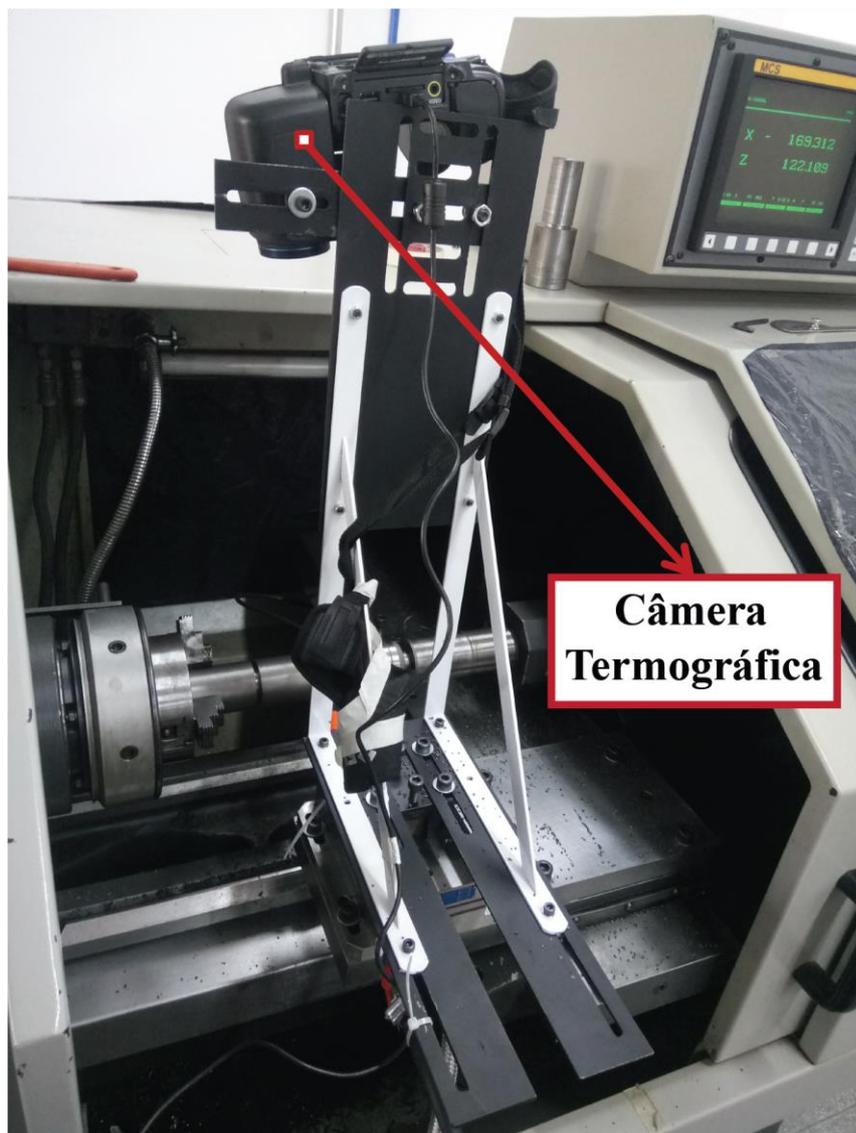


Fonte: O próprio autor.

Os termopares enviavam um sinal ao sistema de aquisição Keysight 34970A Data Acquisition o qual devido a uma configuração inicial, transformava esse sinal em leituras de temperatura. O sistema de aquisição era controlado por um computador, sendo neste último onde se tinha acesso às temperaturas medidas.

Além da medição das temperaturas pelos termopares, outro aparelho usado para medição das temperaturas foi uma câmera termográfica do modelo FLIR T450sc, Figura 4.2. Ela foi posicionada acima da ferramenta. Sua posição respeitava uma distância mínima indicada para o não comprometimento das medições. Os valores medidos eram salvos no computador através de um software próprio dos desenvolvedores da câmera.

Figura 4.2 - Sistema de medição evidenciando a câmera termográfica.



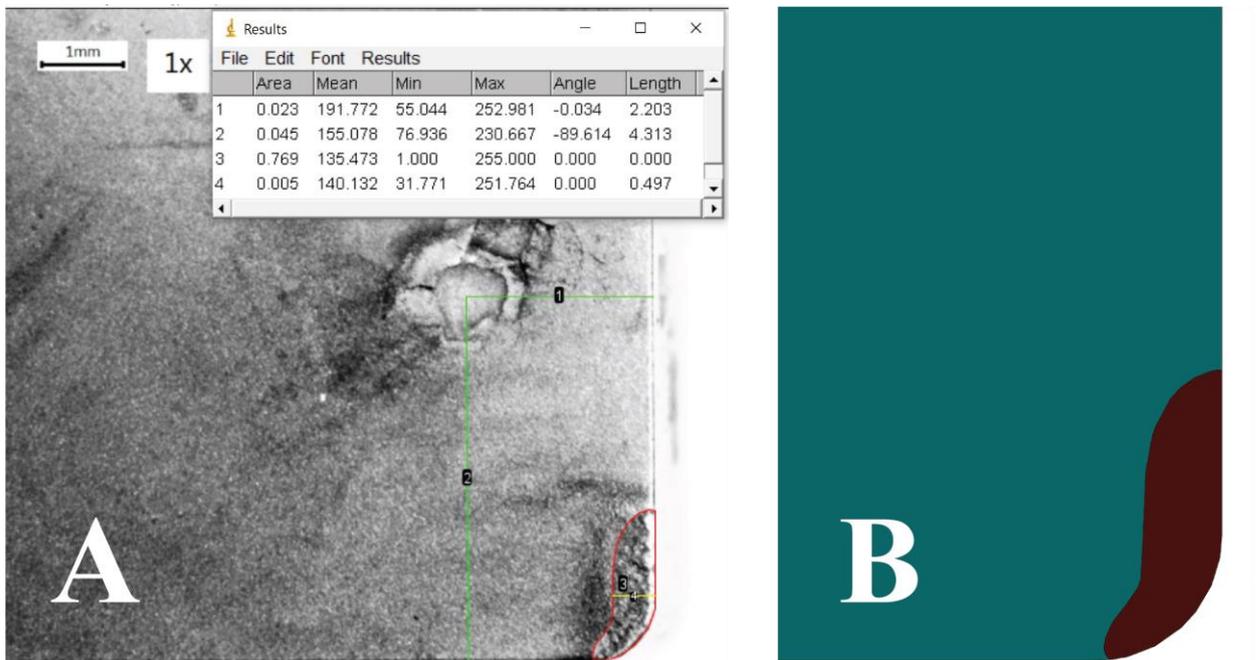
Fonte: O próprio autor

As condições de corte foram moderadas. Foi usada uma velocidade de corte  $V_c = 150$  m/min, avanço de  $f = 0,2$  mm/rot e profundidade de corte  $a_p = 1,5$  mm.

O ferro fundido nodular, quando usinado, produziu cavacos que eram um empecilho para os termopares posicionados. Por mais que os cavacos eram pequenos, eles ainda tocavam os termopares. Dependendo da frequência e quantia de impacto que o termopar sofria, ele se desprendia da ferramenta inviabilizando assim as leituras de temperatura. Outro problema era o agrupamento desses cavacos em cima de um termopar ou próximo à ponta da ferramenta. Esses agrupamentos cobriam o local de interesse para avaliação da câmera infravermelha. Algumas das soluções para esses problemas seriam: adicionar o jateamento de um fluido durante a usinagem, o qual iria expelir esse cavaco, outra possibilidade seria usinar um material mais duro para formar cavacos ainda menores.

A ferramenta era retirada logo após o uso de sua ponta de corte. O desgaste na ponta devido à usinagem era avaliado com o uso do microscópio Olympus SZ61 Stereo. A análise desse desgaste servia como base para sua reprodução em desenho por um *software* de *Computer Aided Design* (CAD). A representação dessa área de contato cavaco-ferramenta é de grande valia, justamente por ser o local onde o fluxo de calor imposto é associado nas simulações. Na Figura 4.3 tem-se uma representação dessa análise no microscópio e sua reprodução em CAD.

Figura 4.3 - Área de contato cavaco-ferramenta real (A) e sua reprodução em CAD (B).



Fonte: O próprio autor

## 5. RESULTADOS

Os levantamentos experimentais e os resultados numéricos são apresentados neste capítulo. Os dados essenciais para o processamento numérico foram as temperaturas obtidas experimentalmente. Essas temperaturas experimentais eram então consideradas nas técnicas inversas e analisadas com auxílio de simulação numérica. Obteve-se os fluxos de calor e as temperaturas estimadas pelo processamento das simulações. A temperatura estimada e a experimental foram então apresentadas para análise e comparação.

A ordem de apresentação deste capítulo segue com a indicação dos filtros usados para selecionar os experimentos para análise. Em sequência os resultados quanto aos termopares foram expostos. Uma comparação entre o método da Função Especificada Não Linear e o método da Regularização de Viagem no Tempo é indicada. Termina-se com a análise dos resultados provenientes da câmera térmica.

### 5.1 Seleção dos Resultados

Cada forma de medição tem sua precisão, detalhes técnicos e toda uma problemática de manuseio. Questões essas que junto às condições do torneamento introduziam erros às medições de temperatura. Dentre os experimentos feitos um filtro foi aplicado para analisar os casos mais ideais. Escolher um experimento ideal ou não foi baseado em dois quesitos:

1. Condições de usinagem comprometeram ou não algum termopar;
2. Câmera térmica e termopar funcionaram ambos durante o experimento;

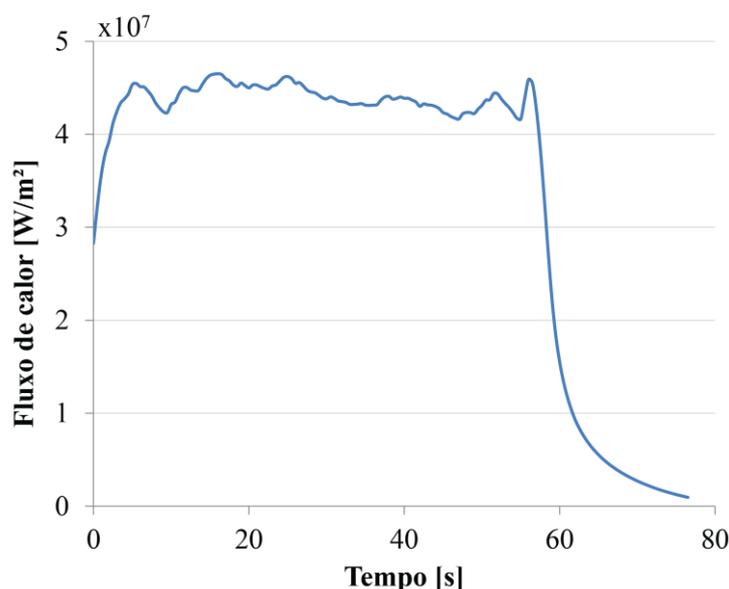
Dos experimentos realizados um será especificamente abordado neste trabalho. Esse experimento respeitou os quesitos indicados anteriormente. Indicações do posicionamento dos termopares e alguns outros detalhes foram indicados adiante.

### 5.2 Função Especificada Não Linear e Termopares

Dos termopares posicionados na ferramenta, aquele que recebeu maior atenção foi o termopar 1. Sua posição na superfície de saída da ferramenta tornava possível a comparação de suas temperaturas com aquelas avaliadas pela câmera térmica. Os dados de temperatura obtidos por esse termopar foram analisados pela técnica da Função Especificada Não Linear. Na Figura 5.1 mostra-se o fluxo de calor estimado pela Função Especificada Iterativa, nesta imagem percebe-se que o fluxo já começa elevado e em poucos instantes alcança valores não tão variáveis. Esses valores mais constantes são repercutidos durante o restante do

torneamento. Ao retirar a ferramenta, o valor de fluxo de calor começa a diminuir, sendo caracterizado pelo resfriamento do modelo térmico.

Figura 5.1 - Fluxo de calor estimado pela Função Especificada Não Linear



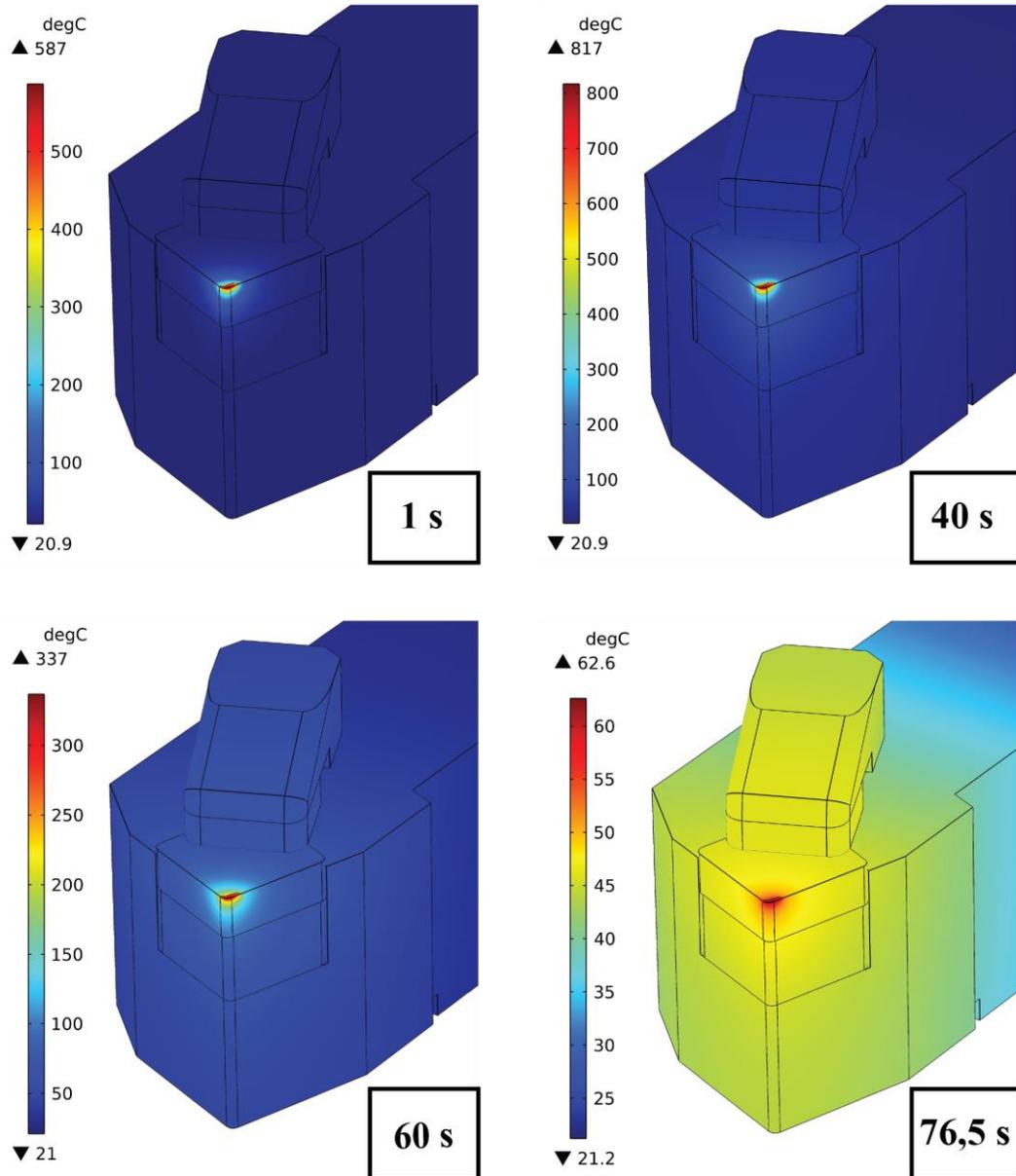
Fonte: O próprio autor.

Uma representação tridimensional (3D) das temperaturas desenvolvidas com o fluxo de calor encontrado pela técnica Função Especificada Não Linear é apresentada na Figura 5.2. Quatro instantes foram abordados nessa figura de acordo com a Figura 5.1: tempo  $t = 1$  s, instante onde o fluxo de calor está aumentando rapidamente no modelo,  $t = 40$  s, para representar a região em que o fluxo de calor fica mais estável,  $t = 60$  s representado o momento onde o fluxo de calor está diminuindo e  $t = 76,5$  s, o fim da simulação numérica.

Com uma avaliação da Figura 5.2, percebe-se uma rápida variação das temperaturas nos quatro instantes abordados. Outro aspecto que pode ser percebido é a concentração de altas temperaturas na ponta da ferramenta usada para o corte. A distribuição de temperatura no momento estável de fluxo de calor (representada em  $t = 40$  s) indica uma temperatura máxima na ponta da ferramenta de valor acima de  $800$  °C.

Na Figura 5.3 observa-se melhor a distribuição de temperatura na ponta da ferramenta de corte. Linhas isotérmicas em graus Celsius (°C) foram indicadas nessa figura. O instante escolhido para sua representação foi o de  $t = 50$  s.

Figura 5.2 - Evolução das temperaturas no modelo 3D.

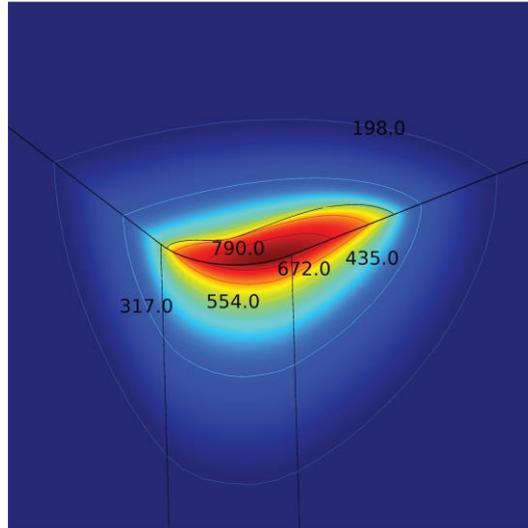


Fonte: O próprio Autor.

Observa-se na Figura 5.3 uma grande variação de temperatura em um curto espaço geométrico. Do contato cavaco-ferramenta, local que apresenta as maiores temperaturas, a alguns poucos milímetros de distância (aproximadamente 5 mm), a diferença de temperatura é próxima de 600 °C.

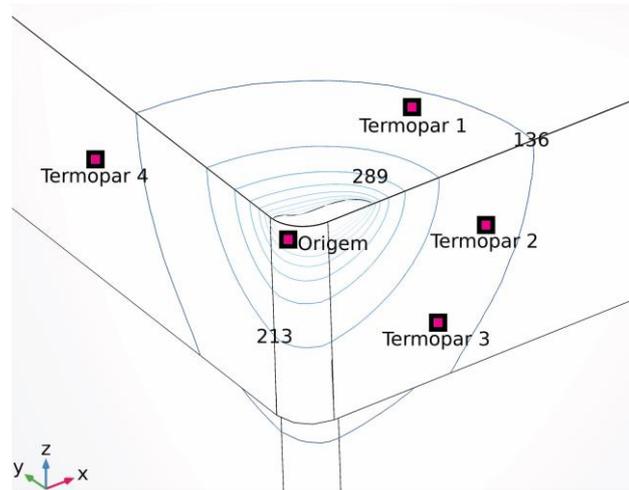
Os termopares representados no modelo térmico estão destacados na Figura 5.4. O instante de representação desta também foi o instante  $t = 50$  s, como da Figura 5.3, mas agora mais linhas isotérmicas foram mostradas. Na Figura 5.4 podem ser notados quatro termopares e uma indicação da origem. A origem foi indicada, tal que junto ao eixo de coordenadas, também exposto na figura, ajudam a distinguir a localização dos termopares, Tabela 5.1. Os termopares de 1 ao 3 foram instalados em zonas de temperatura similares. O termopar 4 permaneceu mais afastado comparado aos outros.

Figura 5.3 - Estimações pelo termopar 1; representação isotérmica no instante  $t = 50$  s.



Fonte: O próprio autor.

Figura 5.4 - Posição dos termopares.



Fonte: O próprio autor.

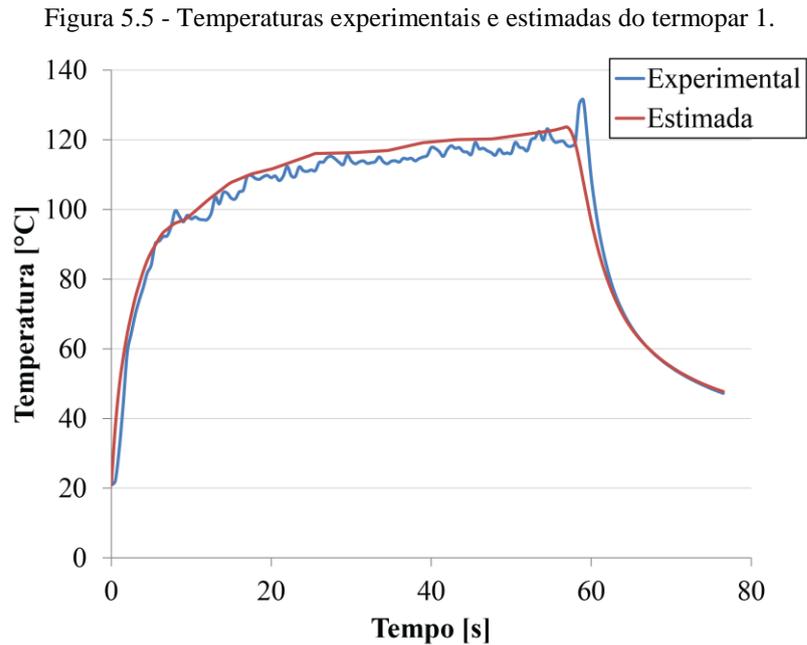
Tabela 5.1 - Posição dos termopares.

Termopar	x [mm]	y [mm]	z [mm]
1	4,31	2,2	0
2	4,43	0	-1,61
3	3,24	0	-3,46
4	0	7	-2,03

Fonte: O próprio autor.

A Função Especificada Não Linear junto às simulações numéricas proporcionaram estimações de temperatura praticamente iguais àquelas medidas pelo termopar 1. Na Figura 5.5 apresenta-se essa representação da similaridade entre as temperaturas estimadas e medidas. Há uma menor inclinação da curva de temperatura no intervalo de  $t = 20$  s à aproximadamente  $t = 56$  s, comparada ao início e fim do teste experimental. Essa menor

inclinação motivou a escolha do instante  $t = 50$  s na Figura 5.3, que neste trabalho é referido como um instante de comportamento estável da experimentação.



Fonte: O próprio autor

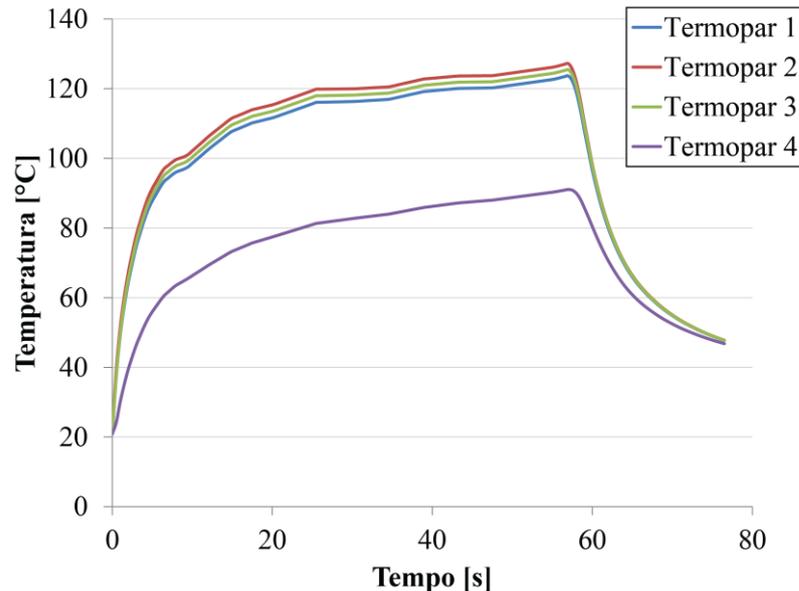
Na Figura 5.6 apresentam-se as temperaturas estimadas para todos os termopares considerados. É possível notar uma proximidade dos valores estimados entre os termopares de 1 ao 3. Interpreta-se que devido à região explorada desses três termopares (Figura 5.4), eles tenham tanto valores estimados, quanto experimentais similares entre si. Concentrando-se em relação às estimações, uma diferença de aproximadamente 30 °C é observada entre esses três termopares mais próximos e o termopar 4 mais afastado.

As temperaturas estimadas para o termopar 1 ficaram próximas aos seus respectivos valores experimentais. As temperaturas experimentais do termopar 1 são usadas na técnica da Função Específica Iterativa. Essa técnica é construída em um contexto de diminuição das diferenças entre temperaturas experimentais e estimadas. Logo, para reafirmar a eficácia dessa técnica vê-se necessário analisar temperaturas experimentais não utilizadas na alimentação do método. Na Figura 5.7 observa-se essa análise.

Os termopares 2 e 3, por estarem em posições diferentes, apresentam temperaturas diferentes do termopar 1, mas devido a estarem aproximadamente em mesma zona de diferença de temperatura, Figura 5.4, mostram certa concordância de estimação com o termopar 1 (Figura 5.6). Uma maior divergência entre o experimental e estimado pôde ser percebido para o termopar 3, divergência de aproximadamente 10°C. Percebe-se nos gráficos da Figura 5.7 a não presença de uma comparação entre as temperaturas estimadas e experimentais do termopar 4. O termopar 4 se despreendeu durante a usinagem e por isso não

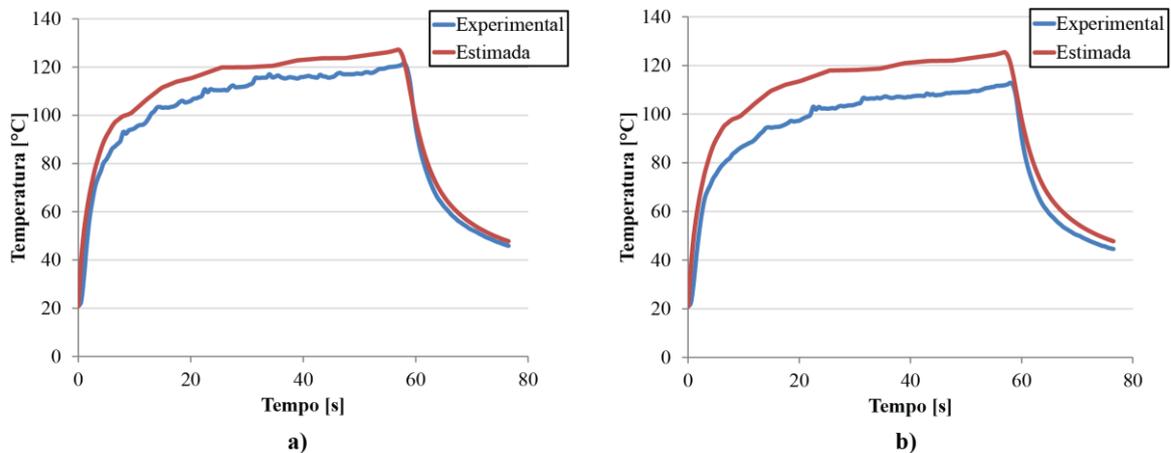
foi indicado, pois inviabilizou a aquisição das temperaturas experimentais. As curvas então apontadas pela Figura 5.5 e Figura 5.7 indicam a Função Específica Iterativa como um método eficaz para determinação das temperaturas.

Figura 5.6 - Temperaturas estimadas de todos os termopares considerados.



Fonte: O próprio autor.

Figura 5.7 - Temperaturas experimentais e estimadas do termopar 2 (a) e termopar 3 (b)

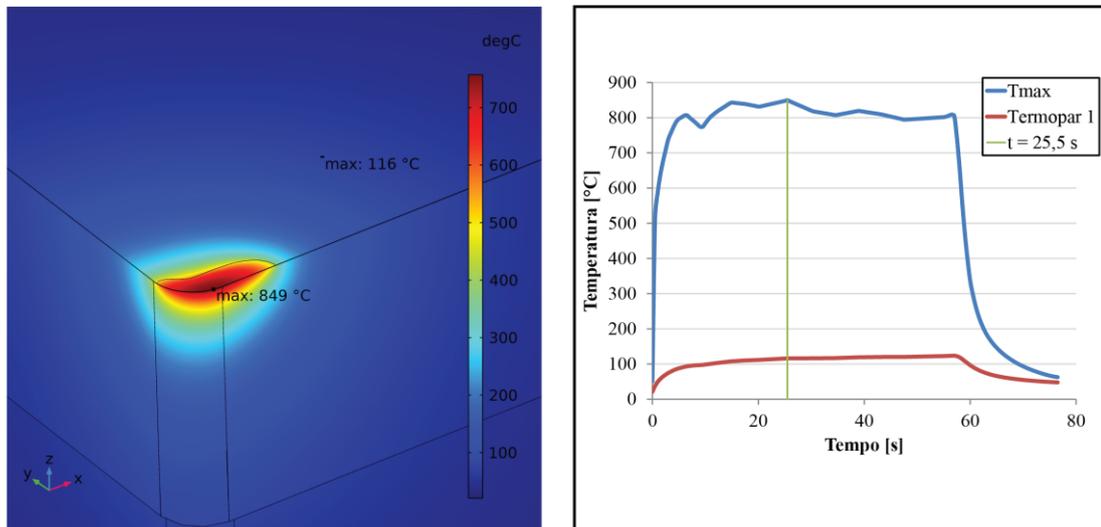


Fonte: O Próprio autor.

O próximo passo de análise é indicar a temperatura desenvolvida na interface cavaco-ferramenta. Na Figura 5.8 analisa-se especificamente essa região. O ponto na Figura 5.8 presente no contato cavaco-ferramenta manteve-se como o ponto de maior temperatura durante toda a análise numérica. Neste trabalho o ponto que apresentou os maiores valores simulados de temperatura será chamado de ponto crítico. Na Figura 5.8, expõe-se o instante em que esse ponto crítico alcança seu valor máximo de temperatura. Esse instante foi o instante  $t = 25.5$  s. Nessa figura há também um ponto mais afastado do contato cavaco-ferramenta, sendo esta posição onde se localiza o termopar 1. O termopar está marcado com

“max” na Figura 5.8, mas vale ressaltar que não é o seu valor máximo de temperatura durante toda a simulação, “max”, ao invés disso, apenas faz referência ao instante de valor máximo do ponto crítico. Percebe-se uma grande diferença de temperatura entre o termopar 1 e o ponto crítico, diferença em torno de 700 °C.

Figura 5.8 - Termopar 1; distribuição de temperatura indicando o ponto crítico e gráfico associado.



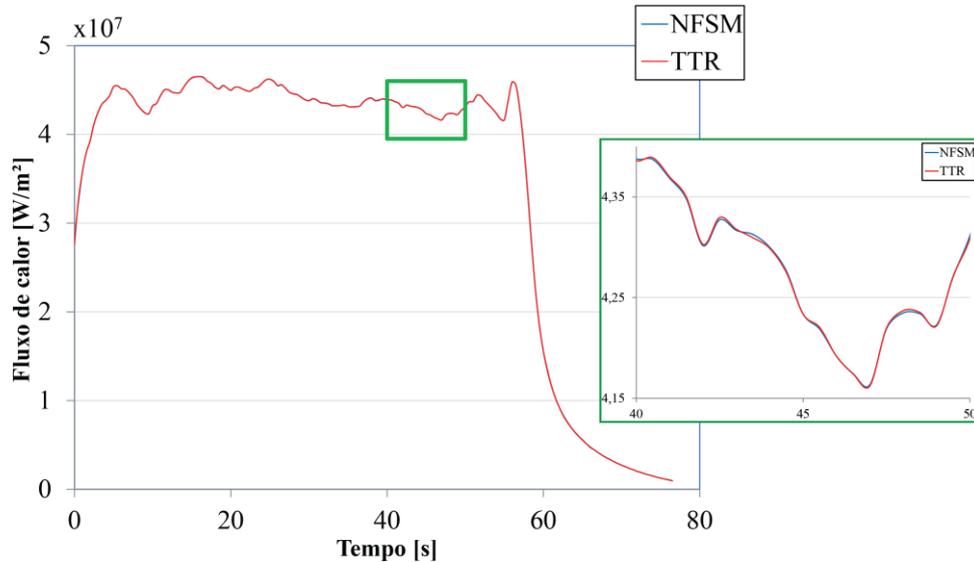
Fonte: O próprio autor.

### 5.3 Análise das técnicas NFSM e TTR

A Regularização de Viagem no Tempo (TTR) foi também aplicada para as estimações do fluxo de calor. Usou-se as medições de temperatura do termopar 1 na aplicação da TTR. Foi necessário se basear no mesmo termopar e na mesma configuração numérica aplicada quanto ao uso da Função Especifica Não Linear (NFSM), para possível comparação entre essas técnicas. Na Figura 5.9 é mostrado o fluxo de calor estimado tanto pela TTR quanto pela NFSM. Nota-se uma diferença entre os fluxos praticamente inexistente. Na Figura 5.9 mostra-se uma aproximação em uma região específica da curva geral para percepção dessa similaridade. Essa igualdade entre as técnicas pode ser compreendida pela TTR poder ser vista, de certa forma, como uma generalização da Função Especificada. Generalização, pois a metodologia da TTR não é limitada à estimação de fluxo de calor.

Não foi feita comparação entre as temperaturas justamente pelos fluxos de calor terem sido praticamente iguais, o que resultaria, conseqüentemente, em temperaturas estimadas também aproximadamente iguais. Ambas as técnicas foram aplicadas considerando  $r = 7$ , valor esse fixado em todas as análises presentes neste trabalho. A TTR demorou mais para concluir a estimação do fluxo de calor, este fator juntamente com a similaridade com a NFSM, fez com que este trabalho se concentrasse em análises apenas pelo uso da Função Especificada Não Linear.

Figura 5.9 - Fluxo estimado pela NFSM e pela TTR.



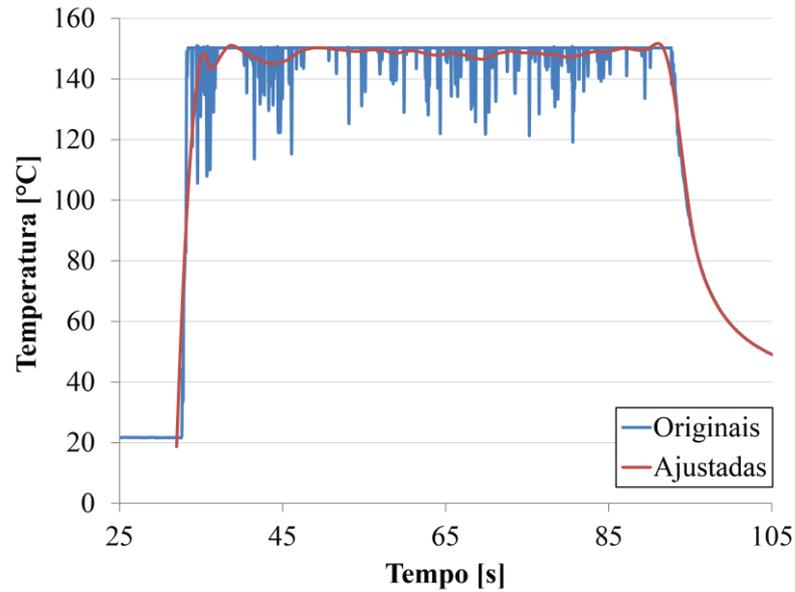
Fonte: O próprio autor.

## 5.4 Função Especificada Não Linear e Câmera Térmica

A câmera térmica foi montada acima da ferramenta de corte durante a experimentação. A angulação e a distância com referência à ferramenta respeitaram considerações técnicas. Foi possível pela configuração experimental desta as medições de temperatura em pontos na superfície de saída da ferramenta. O termopar 1 era o único termopar possível de ser visualizado pela câmera. Foi feita uma análise de distância entre os pontos posicionados pela câmera e o local de posicionamento do termopar 1. Dentre os pontos de medição estabelecidos na câmera aquele menos distante do local onde se encontrava o termopar foi escolhido. Como a distância entre eles era muito pequena, e levando em consideração que ao termopar ser soldado formava-se uma semi-esfera de solda, o ponto selecionado da câmera foi considerado de posição igual ao do termopar 1 (Tabela 5.1). Na Figura 5.10 são mostradas as medições de temperatura pela câmera nesse ponto selecionado.

O cavaco é um subproduto da usinagem. Por mais que a peça usada para simulação proporcionasse cavacos bem pequenos, estes ainda afetaram as medições pela câmera. Os cavacos ao se desprenderem da peça percorriam as mais variadas direções, e algumas dessas faziam-no atravessar o campo de visão da câmera térmica. Cada vez que um cavaco passava por esse campo de visão a câmera térmica media um pico de temperatura. O gráfico da Figura 5.10 foi feito especialmente para indicar esses picos de temperatura. Nesta mesma figura também é indicado o resultado das medições após um filtro ajustar as temperaturas; eliminando os picos.

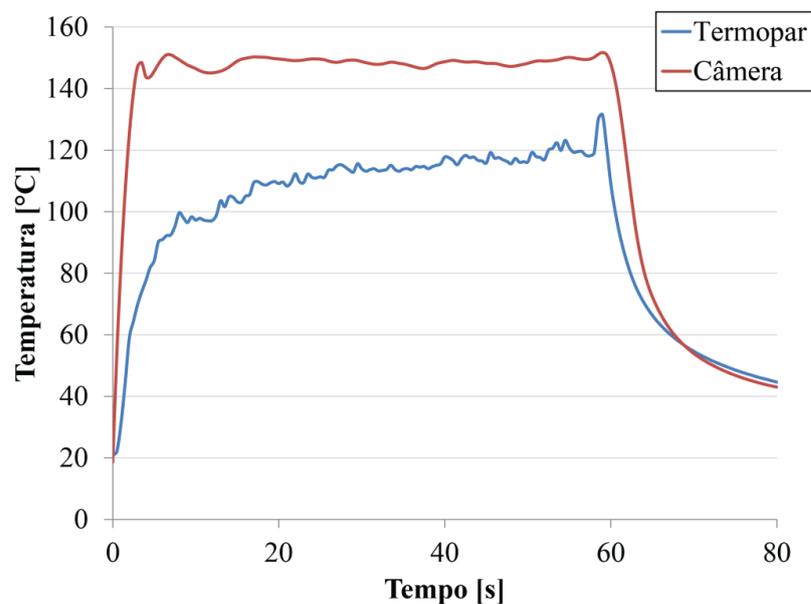
Figura 5.10 - Temperaturas medidas pela câmera antes e após o filtro.



Fonte: O próprio autor.

A nível de comparação entre a curva ajustada das temperaturas da câmera térmica (Figura 5.10) e as temperaturas medidas pelo termopar 1, foi construído o gráfico da Figura 5.11. É perceptível uma diferença considerável entre as temperaturas medidas, diferença por volta de 30 °C. Essa diferença pode possivelmente ser associada a um erro técnico de configuração da câmera. Possivelmente a emissividade configurada não estava adequada. Isso pode ser melhor explorado no futuro. Algumas outras questões a pontuar é que a diferença entre as medições diminuem à medida que o tempo de usinagem aumenta, e que a curva da câmera térmica varia menos com o tempo do que a do termopar.

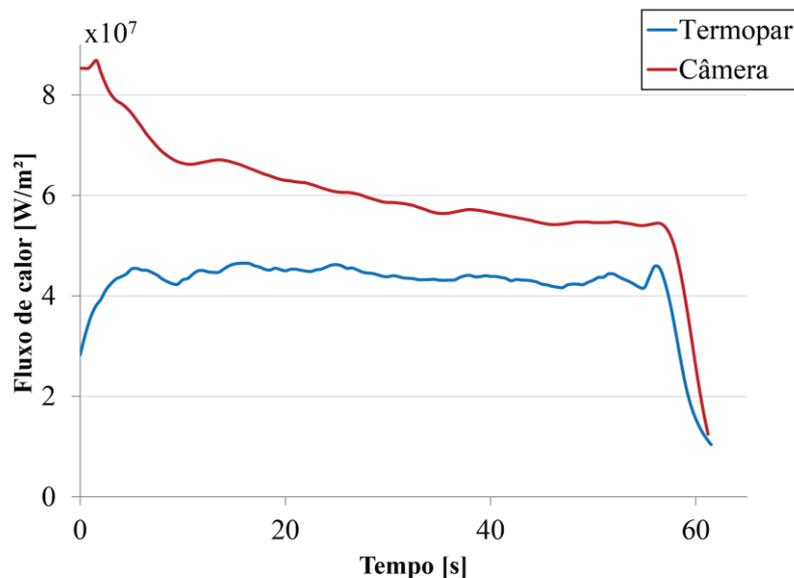
Figura 5.11 - Temperaturas medidas pelo termopar 1 e pela câmera térmica.



Fonte: O próprio autor.

Mesmo diante da diferença entre as temperaturas a análise das medições da câmera térmica vê-se como necessária. Pode-se prever por essa diferença das temperaturas da Figura 5.11 que o fluxo de calor e as temperaturas estimadas serão maiores do que para o caso do termopar. Na Figura 5.12 apresenta-se o fluxo de calor estimado pela Função Específica Não Linear para a câmera térmica, além disso, indica também o fluxo de calor estimado quando usado o termopar. Um reflexo do pontuado anteriormente da diferença de temperatura diminuir com o decorrer do tempo entre os métodos de medição (Figura 5.11) pode ser percebido na Figura 5.12. Com o tempo os fluxos de calor vão se assimilando mais em formato, no final apontando uma diferença aproximada de  $1 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ . O alto fluxo de calor inicial percebido pelo uso da câmera térmica possivelmente está associado à rápida variação de temperatura notada pela câmera, que em 0 s era  $18,66 \text{ }^\circ\text{C}$  e 0,5 s após era  $53,87 \text{ }^\circ\text{C}$ , isso contra o termopar em 0 s com  $20,88 \text{ }^\circ\text{C}$  e em 0,5 s com  $22,08 \text{ }^\circ\text{C}$ .

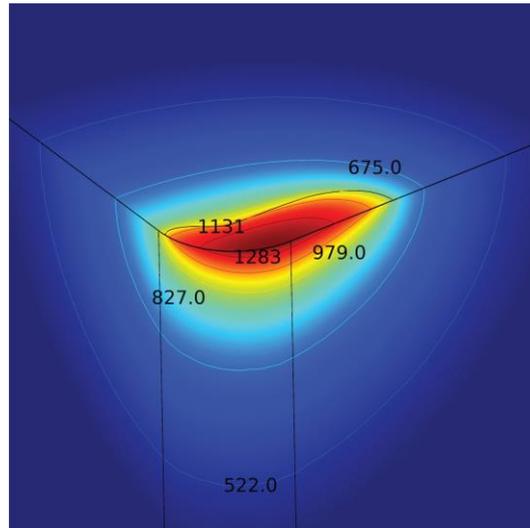
Figura 5.12 - Fluxo de calor estimado pela NFSM para o termopar 1 e para a câmera térmica.



Fonte: O próprio autor.

Como feito na seção sobre o termopar, agora para a câmera, foram analisadas as temperaturas estimadas na ponta de corte no instante  $t = 50 \text{ s}$ . Na Figura 5.13 as temperaturas nesse instante são apresentadas. São notadas temperaturas muito mais elevadas que as da Figura 5.3, considerando a linha isotérmica com maior temperatura em ambos os casos, a estimativa pela câmera térmica indicou  $493 \text{ }^\circ\text{C}$  acima da do termopar em mesmo instante.

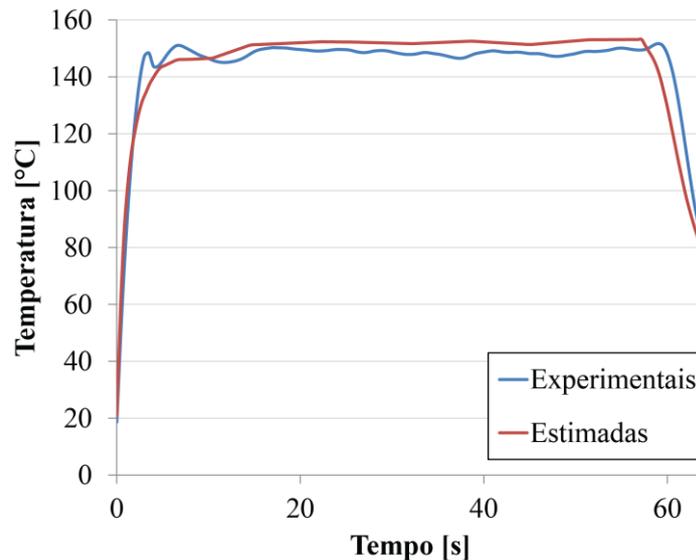
Figura 5.13 - Estimações pela câmera; representação isotérmica no instante  $t = 50$  s.



Fonte: O próprio autor

Na Figura 5.14 apresentam-se as temperaturas experimentais e estimadas pela Função Especificada Iterativa quando usadas as medições da câmera térmica.

Figura 5.14 - Temperaturas experimentais e estimadas da câmera térmica.

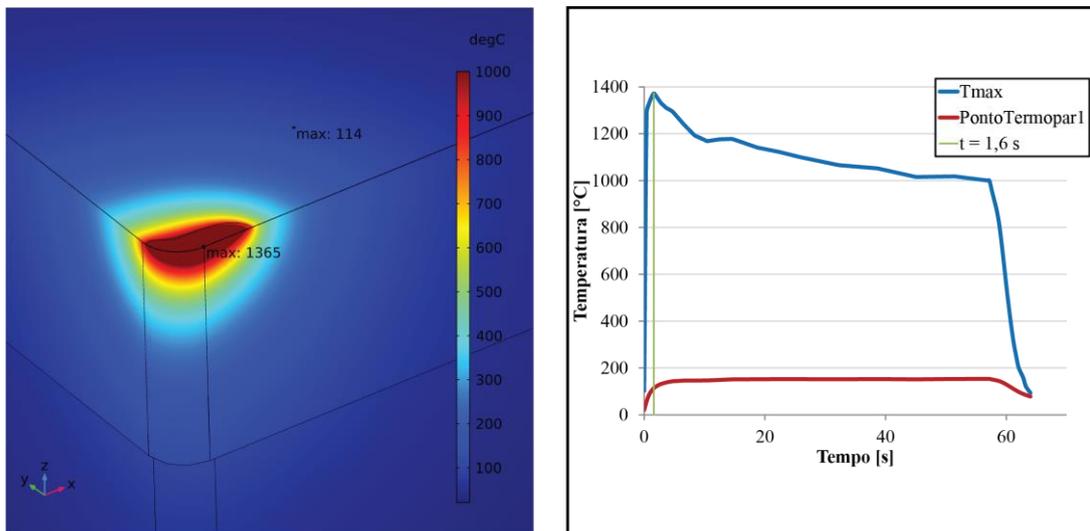


Fonte: O próprio autor.

Fazendo o mesmo previamente abordado para o termopar, estimaram-se as temperaturas no contato cavaco-ferramenta. Uma vez percebida a eficiência da técnica de estimação das temperaturas, torna-se válido explorar quais as temperaturas desenvolvidas nesse contato. O gráfico na Figura 5.15 indica a evolução de temperatura do ponto crítico comparada a da posição igual ao do termopar 1. A diferença das temperaturas, quando mais estável, foi de mais de  $800^{\circ}\text{C}$ . Também na Figura 5.15 foi indicada uma imagem de quando o ponto crítico alcançou seu maior valor de temperatura, isso no instante  $t = 1,6$  s. A diferença de

temperatura em  $t = 1,6$  s entre a também considerada posição do termopar 1 e o ponto crítico, foi de  $1.251$  °C.

Figura 5.15 - Câmera térmica; distribuição de temperatura indicando o ponto crítico e gráfico associado.



Fonte: O próprio autor.

As Figuras 5.15 e 5.8 podem ser comparadas. Desconsiderando que foram evidenciadas em instantes diferentes e avaliando os máximos de temperatura entre seus pontos críticos têm-se  $516$  °C de diferença. Isso com a estimacão feita pela câmara térmica apresentando tal valor acima da estimacão feita com o uso do termopar.

## 6. CONCLUSÕES

### 6.1 Conclusões Gerais

Uma abordagem numérica e experimental foi feita neste trabalho. Duas metodologias de medição das temperaturas foram abordadas, uma usava o termopar como sensor de temperatura, a, outra usava a câmera térmica. O uso da câmera térmica como aparelho de medição das temperaturas e associação dessa ao uso de problemas inversos é interessante. Entretanto, o destaque do trabalho reside em associar esse processo abordado pela câmera térmica com outro processo, o que envolve a aplicação de termopares.

Usou-se a Função Especificada Iterativa e a Regularização de Viagem no Tempo como técnicas inversas para estimação do fluxo de calor. Os fluxos de calor estimados eram inseridos no problema direto para obtenção das temperaturas estimadas. Por fim as temperaturas estimadas eram analisadas em conjunto com as temperaturas experimentais. Os dois métodos de resolução dos problemas inversos apresentaram resultados praticamente iguais. Priorizou-se o uso da Função Especificada Não Linear neste trabalho por ela ter sido mais rápida em fornecer a solução.

Considerando os métodos de medição das temperaturas, ambos são afetados pelo cavaco, só que de formas diferentes. O cavaco pode provocar o desprendimento dos termopares fixados na ferramenta, inclusive, aconteceu tal evento referente ao termopar 4. Além disso, quando os cavacos percorrem direções que cruzam a área de visão da câmera térmica, eles poluem muito as medições, podendo mesmo inviabilizar certos métodos de suavização de curva.

As temperaturas determinadas nas pontas das ferramentas são bem altas comparadas às aquelas de pontos mais afastados. Do ponto crítico a um ponto de aproximadamente 5 mm de distância em linha reta pode-se ter uma diferença de temperatura maior que 600 °C.

Uma diferença considerável entre as temperaturas estimadas pelo uso da câmera e pelo uso dos termopares foi evidenciada. Considerando o ponto crítico, aquele que apresentava as maiores temperaturas durante toda a simulação, e levando ainda em consideração seu valor de máximo para ambos os casos, obteve-se uma diferença de 516 °C. Isso com a estimação feita pela câmera térmica apresentando tal valor acima da estimação feita com o uso do termopar.

## 6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Os cavacos interferem drasticamente nas medições de temperatura, mas também não devem ser considerados como elementos principais para usar ou não uma peça. Por exemplo, se preocupar com o cavaco a ponto de escolher uma peça que produza cavacos menores, pode restringir o uso de peças que realmente são usuais. O aconselhável é usar peças mais utilizadas na indústria, e que independente dos cavacos, haja alguma forma de diminuir o impacto desses nos aparelhos de medição de temperatura. Então, como abordagem futura, determinar algum meio de diminuir o impacto dos cavacos nas medições seria interessante.

As estimações feitas pela câmera térmica não foram tão em encontro às estimações feitas com o uso do termopar. Para uma análise futura seria adequado não só uma melhor compreensão do impacto externo nas medições de temperatura da câmera térmica, como também o impacto externo nas medições dos termopares. Com essa abordagem seria possível melhor classificar os dados obtidos experimentalmente.

Aumentar o número de experimentos e melhorar as técnicas de análise de dados. Um exemplo é a aplicação de Planejamento de Experimentos. Outro caso é associado a um aumento do número de dados adquiridos; não se restringindo às temperaturas, mas abordando também forças, vibrações, e outros aspectos.

O uso ou não de fluidos de corte frequentemente é associado a questões ambientais. Cresce uma necessidade entre as empresas para terem uma produção mais limpa. No intuito de produzir um trabalho mais de encontro às necessidades de respeito ao ambiente, abordar fluidos de corte seria enriquecedor em conhecimento. Avaliar a eficácia desses ajudaria no julgamento sobre usá-los ou não, ou quais fluidos impactariam menos o ambiente.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHSAN, K. B.; MAZID, A. M.; CLEGG, R.E.; PANG, G. K. H.; 2012, “Study on Carbide Cutting Tool Life Using Various Cutting Speeds for  $\alpha$ - $\beta$  Ti-Alloy Machining”. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, vol. 55, pp. 600-606.

ANSELMO, B. C. S. (2020), Análise da Transferência de Calor por Convecção Natural em Dissipadores de Calor Usando Planejamento de Experimentos, Itajubá, 141p. Tese de Doutorado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

ANTIA, H. M.; 2012, “Numerical Methods for Scientists and Engineers”, Hindustan Book Agency, 3<sup>o</sup> ed., Nova Delhi, Deli, Índia.

BECK, J. V.; BLACKWELL, B; CLAIR, C. R. ST.; 1985, “Inverse Heat Conduction: Ill-Posed Problems”. Wiley-Interscience, New York.

BRITO, R. F.; CARVALHO, S. R., LIMA E SILVA, S. M. M.; 2015, “Experimental Investigation of Thermal Aspects in a Cutting Tool Using Comsol and Inverse Problem”. **Applied Thermal Engineering**, vol. 86, pp. 60-68.

COTTERELL, M.; ARES, E.; YANES, J.; LÓPEZ, F.; HERNANDEZ, P.; PELÁEZ, G.; 2013, “Temperature and Strain Measurement During Chip Formation in Orthogonal Cutting Conditions Applied to Ti-6Al-4V”. **Procedia Engineering**, vol. 63, pp. 922 – 930.

FAKIR R.; BARKA N.; BROUSSEAU, J.; 2018, “Case Study of Laser Hardening Process Applied to 4340 Steel Cylindrical Specimens Using Simulation and Experimental Validation”. **Case Studies in Thermal Engineering**, vol.11, pp. 15–25.

FERREIRA D. C.; MAGALHÃES E. S.; BRITO, R. F.; LIMA E SILVA, S. M. M.; 2018, “Numerical Analysis of the Influence of Coatings on a Cutting Tool Using COMSOL”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 97, pp. 1305-1314.

GRZESIK, W.; 2017, “Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling, and Applications”, Elsevier B.V., 3<sup>o</sup> ed., Amsterdam, Netherlands.

GRZESIK, W.; NIESŁONY, P.; BARTOSZUK, M.; 2009, “Modelling of The Cutting Process Analytical and Simulation Methods”. **Advances in Manufacturing Science and Technology**, vol. 33, no. 1.

GRZESIK, W.; RECH, J.; ŻAK, K.; 2014, “Determination of Friction in Metal Cutting With Tool Wear and Flank Face Effects”. **Wear**, vol. 317, pp. 8-16.

HEIGEL, J.C.; WHITENTON, E.; LANE, B.; DONMEZ, M. A.; MADHAVAN, V.; MOSCOSO-KINGSLEY, W.; 2017, “Infrared Measurement of the Temperature at the Tool-Chip Interface while Machining Ti-6Al-4V”. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 243, pp. 123–130.

HUANG, S.; TAO, B.; LI, J.; FAN, Y.; YIN, Z.; 2018a, “Estimation of the Time and Space-Dependent Heat Flux Distribution at the Tool-Chip Interface During Turning Using an Inverse Method and Thin Film Thermocouples Measurement”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 99, pp.1531-1543.

- HUANG, S.; TAO, B.; LI, J.; FAN, Y.; YIN, Z.; 2018b, “On-line Estimation of the Tool-Chip Interface Temperature Field During Turning Using a Sequential Inverse Method”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 97, pp. 939-952.
- JIANG, F.; ZHANG, T.; YAN, L.; 2016, “Estimation of Temperature-Dependent Heat Transfer Coefficients in Near-Dry Cutting”. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 86, pp. 5–8.
- JOMAA, W.; SONGMENE, V.; BOCHER, P.; 2015, “An Investigation of Machining-Induced Residual Stresses and Microstructure of Induction-Hardened AISI 4340 Steel”. **Materials and Manufacturing Processes**, vol. 31, pp. 838–844.
- KOVAC, P.; GOSTIMIROVIC M.; RODIC D.; SAVKOVIC B.; 2019, “Using the Temperature Method For the Prediction of Tool Life in Sustainable Production”. **Measurement**, vol. 133, pp. 320–327.
- LIANG, S. Y.; SHIH, A. J.; 2015, “Analysis of Machining and Machine Tools”, Springer New York Heidelberg Dordrecht London.
- MAGALHÃES, E. S.; ANSELMO, B. C. S.; LIMA E SILVA , A. L. F.; LIMA E SILVA, S. M. M.; 2018, “Time Traveling Regularization for Inverse Heat Transfer Problems”. **Energies**, vol 11, pp. 507.
- MÖHRING, H., KUSHNER, V. K., STORCHAK, M., STEHLE, T.; 2018, “Temperature Calculation in Cutting Zones”. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, vol. 67, pp. 61-64.
- OLIVEIRA, G. C.; RIBEIRO, S. S.; GUIMARÃES, G.; 2021, “An Inverse Procedure to Estimate the Heat Flux at Coated Tool-Chip Interface: a 3D Transient Thermal Model”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol.112, pp. 3327–3341.
- ÖZISIK, M. N.; ORLANDE, H. R. B.; 2000, “Inverse Heat Transfer: Fundamentals and Applications”, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- PARIDA , A. K.; MAITY, K.; 2019, “Numerical and Experimental Analysis of Specific Cutting Energy in Hot Turning of Inconel 718”. **Measurement**, vol. 133, pp. 361–369.
- PRASAD , B. S.; PRABHA, K. A.; KUMAR, P. V. S. G.; 2017, “Condition Monitoring of Turning Process Using Infrared Thermography Technique: An Experimental Approach”. **Infrared Physics & Technology**, vol. 81 , pp. 137–147.
- REZENDE, B. A.; MAGALHÃES, F. C.; RUBIO, J. C. C.; 2020, “Study of the Measurement and Mathematical Modelling of Temperature in Turning by Means Equivalent Thermal Conductivity”. **Measurement**, vol. 152, 107275.
- SILVA, R. G. D.; MAGALHÃES, E. S.; LIMA E SILVA, S. M. M.; 2021, “Modified Nonlinear Function Specification and Temperature Moving Sensor to Estimate the Heat Supply in a Welding Process”. **International Journal of Thermal Sciences**, vol. 162, 106780.
- SIVARAMAKRISHNAIAH, M.; KUMAR, P. N.; JANARDANA, G. R. J.; 2017, “Online Monitoring of Metal Cutting of Inconel 600 with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Coated Carbide Tools”. **Materials Today: Proceedings**, vol. 4, pp. 1550-1560.

SOLER, D.; ARISTIMUÑO, P.X.; SAEZ-DE-BURUAGA, M.; GARAY, A.; ARRAZOLA, P.J.; 2018, “New Calibration Method to Measure Rake Face Temperature of the Tool During Dry Orthogonal Cutting Using Thermography”. **Applied Thermal Engineering**, vol. 137, pp. 74-82.

STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU J. S.; 2016, “Metal Cutting Theory and Practice”, CRC Press, 3° ed., Boca Raton, Florida.

SU, G.; XIAO, X.; DU, J.; ZHANG, J.; ZHANG, P.; LIU, Z.; XU, C.; 2020, “On Cutting Temperatures in High and Ultrahigh-Speed Machining”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 107, pp. 73-83.

VAJDI, M.; MOGHANLOU, F. S.; SHARIFIANJAZI, F.; ASL, M. S.; SHOKOUHIMEHR, M.; 2020, “A Review on the Comsol Multiphysics Studies of Heat Transfer in Advanced Ceramics”. **Composites and Compounds**, vol. 2, pp. 35-44.

WANG, Y.; LIU, J.; LIU, K.; LIU, Z.; WANG, S.; DAI, M.; 2020, “Modeling of Temperature Distribution in Turning of Ti-6Al-4V With Liquid Nitrogen Cooling”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, vol. 107, pp. 451-462.

WENG, J.; ZHUANG, K.; HU, C.; ZHU, D.; GUO, S.; DING, H.; 2019, “A Novel Approach to Thermal Modeling Based on Three-Dimensional Analysis in Turning Inconel 718 with Round Insert”. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 266, pp. 588-598.

WOODBURY, K. A.; 2003, “Inverse Engineering Handbook”, CRC Press, Boca Raton, Florida.

XIAN, Y.; ZHANG, P.; ZHAI, S.; YUAN, P.; YANG, D.; 2018, “Experimental Characterization Methods for Thermal Contact Resistance: A Review”. **Applied Thermal Engineering**, vol. 130, pp. 1530-1548.