



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



LUCAS GOUVEIA BONTEMPO

**ANÁLISE NUMÉRICA DO FLUXO DE CALOR NA INTERFACE
CAVACO-FERRAMENTA NO PROCESSO DE TORNEAMENTO**

**OURO PRETO - MG
2023**

LUCAS GOUVEIA BONTEMPO

lucas.gouveiab@gmail.com

**ANÁLISE NUMÉRICA DO FLUXO DE CALOR NA INTERFACE
CAVACO-FERRAMENTA NO PROCESSO DE TORNEAMENTO**

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

Professor orientador: DSc. Igor César Pereira

Professor coorientador: DSc. Alisson Augusto Azevedo Figueiredo

**OURO PRETO – MG
2023**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B722a Bontempo, Lucas de Gouveia.

Análise numérica do fluxo de calor na interface cavaco-ferramenta no processo de torneamento. [manuscrito] / Lucas de Gouveia Bontempo. - 2023.

29 f.

Orientador: Prof. Dr. Igor César Pereira.

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

1. Usinagem. 2. Torneamento. 3. Análise Numérica. 4. Métodos inversos (Matemática). I. Pereira, Igor César. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucas Gouveia Bontempo

Análise numérica do fluxo de calor na interface cavaco-ferramenta no processo de torneamento

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

Aprovada em 24 de agosto de 2023

Membros da banca

[DSc] - Igor César Pereira - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto

[DSc] - Luis Antônio Bortolaia - Universidade Federal de Ouro Preto

[DSc] - Edson Alves Figueira Junior - Universidade Federal de Ouro Preto

Igor César Pereira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 01/11/2023



Documento assinado eletronicamente por **Igor Cezar Pereira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/11/2023, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0618431** e o código CRC **D1B3F601**.

RESUMO

A estimativa do fluxo de calor na região de contato cavaco-ferramenta apresenta desafios para o estado da arte dos processos de usinagem. Contudo, os métodos de medição de temperatura em processos de usinagem vêm se aprimorando e impactando diretamente em avanços nos métodos analíticos, numéricos e experimentais utilizados para estimar o fluxo de calor nessa região. Através de métodos matemáticos, é possível estimar com certa precisão a distribuição de temperatura, assim como o fluxo de calor em uma região, a partir da medição de temperatura utilizando termopares acoplados em pontos determinados. Esse trabalho possui a finalidade de demonstrar uma solução através dos métodos analíticos, do algoritmo que modela a Função Especificada Sequencial e do Método dos Elementos Finitos, para o problema de estimar o fluxo de calor no sistema formado pela ferramenta e cavaco no processo de torneamento, a partir de dados de temperatura na região. Com esse objetivo, foram consideradas as condições de contorno de outros estudos científicos, analisadas através da programação do software COMSOL, para a modelagem computacional do sistema. Foram usadas no modelo a condução de calor no substrato, a perda de calor por convecção e radiação como condições de contorno. Através das iterações realizadas pela Função Especificada Sequencial, utilizando o software MATLAB, foi possível estimar o fluxo de calor com precisão relevante em comparação nos resultados de temperatura. A diferença de temperatura ao longo do tempo entre a estimada e a usada de referência apresentou baixo erro residual, reforçando a assertividade do método utilizado.

Palavras-chave: Análise Numérica, Métodos Inversos, Função Especificada Sequencial, Simulação Multifísica, Torneamento, Usinagem.

ABSTRACT

The estimation of the heat flux in the chip-tool contact region presents challenges for the state-of-the-art machining processes. However, methods for measuring temperature in machining processes have been improving and directly impacting advances in analytical, numerical and experimental methods used to estimate the heat flow in this region. Through mathematical methods, it is possible to estimate with some precision the temperature distribution, as well as the heat flux in a region, from the temperature measurement using thermocouples coupled at certain points. This work has the purpose of demonstrating a solution through analytical methods, the algorithm that models the Sequential Specified Function and the Finite Element Method, for the problem of estimating the heat flux in the system formed by the tool and chip in the turning process, from temperature data in the region. With this objective, the boundary conditions of other scientific studies were considered, analyzed through the programming of the COMSOL software, for the computational modeling of the system. Heat conduction in the substrate, heat loss by convection and radiation were used in the model as boundary conditions. Through the iterations performed by the Sequential Specified Function, using the MATLAB software, it was possible to estimate the heat flux with relevant precision in comparison with the temperature results. The temperature difference over time between the estimated temperature and the reference used showed a low residual error, reinforcing the assertiveness of the method used.

Key-words: Numerical Analysis, Inverse Methods, Sequential Procedure, Multiphysics Simulation, Turning, Machining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Métodos Utilizados para Distribuição de Temperatura	7
Figura 2 Fluxograma do Procedimento Metodológico	12
Figura 3 Geometria e condições de contorno da ferramenta de corte.....	14
Figura 4 Programação do software COMSOL.	16
Figura 5 Temperatura usada de referência (TC3).....	17
Figura 6 Sensibilidade calculada pelo software COMSOL	18
Figura 7 Fluxo de calor estimado pelo algoritmo da Função Sequencial	18
Figura 8 Comparação entre a temperatura estimada e a usada de referência.....	19
Figura 9 Erro residual da comparação de temperatura	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Técnicas Inversas por resíduo	7
Tabela 2 Técnicas Inversas por tempo	8
Tabela 3 Variáveis e indicadores utilizados	13

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema	1
1.2	Justificativa	2
1.3	Objetivos	3
1.3.1	Geral.....	3
1.3.2	Específicos	3
1.4	Estrutura do Trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Usinagem Mecânica e Campo Térmico.....	5
2.2	Condições de Contorno.....	5
2.3	Modelo de Solução	6
2.4	Método Inverso	7
3	METODOLOGIA	11
3.1	Tipo de Pesquisa.....	11
3.2	Materiais e Métodos	12
3.3	Variáveis e indicadores.....	13
3.4	Instrumentos de coleta de dados.....	13
3.5	Formulação do modelo analítico	15
4	RESULTADOS.....	16
4.1	Características do processo	16
4.2	Modelagem no software COMSOL.....	17
4.3	Método inverso.....	18
4.4	Método da função especificada sequencial.....	19
5	CONCLUSÃO	22
5.1	Conclusão.....	22
5.2	Recomendações	23
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	24

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Os processos de usinagem são parte fundamental da produção industrial contemporânea, fazendo com que seja de considerável relevância o estudo dos parâmetros de operação utilizados, a fim de otimizar a produção a partir deles. Figueiredo *et al.* (2022) ressalta que é possível alcançar maior produção e vida útil de uma ferramenta de usinagem controlando sua temperatura e condições de operação. A partir do estudo e experimentação dos parâmetros e condições de contorno desses métodos de produção, é possível obter possibilidades de operação com menor custo e maior eficiência (SILVA *et al.*, 2021).

Uma das maiores dificuldades na usinagem é a determinação do fluxo de calor na superfície de contato entre a ferramenta de corte e a peça que está sendo usinada, devido ao limitado acesso à região de contato não exposta da peça e da ferramenta no momento do corte (SILVA *et al.*, 2021).

O problema da determinação precisa do fluxo de calor em determinadas zonas de cisalhamento durante a usinagem pode ser trabalhado através de uma comparação entre o método experimental de medição de temperatura e o método analítico e numérico para sua determinação.

Os métodos experimentais não oferecem solução para estimar o fluxo de calor na zona de contato entre a ferramenta de corte e a peça, por fatores como a dificuldade de alcance à região de contato não exposta da peça e da ferramenta, como elucidada Figueiredo *et al.* (2022). Esses métodos de medição de temperatura vêm sendo amplamente explorados pela indústria nas últimas décadas, como a medição por radiação, utilizando sensores infravermelhos que, no entanto, possuem limitações quanto a interferência de medição por emissividade de fluidos de corte, alto custo do equipamento e dificuldade de calibração de emissividade. Outro, que está sendo utilizado para comparação nesse trabalho, é a medição através de termopares que são acoplados em pontos estratégicos da ferramenta de corte para medir a temperatura na ferramenta.

Os métodos numéricos para determinação do campo térmico no processo de torneamento fazem parte de um campo de estudo emergente para otimização de parâmetros e condições de contorno de operação, devido ao baixo custo de implementação e precisão considerável, como ressaltam Custódio (2016) e Ferreira (2017). Contudo, apresentam

limitações pela variação indefinida, ou de complexa modelagem, de parâmetros e condições de contorno que influenciam na determinação do fluxo de calor nos processos de transferência térmica.

Pensando nessas limitações, foi feita uma modelagem do sistema da ferramenta de corte para usinagem, considerando, através de expressões analíticas, as condições de contorno que regem o problema. Essas formulações foram aplicadas na matemática implícita do *software* COMSOL, que utiliza de métodos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos, para gerar o campo térmico na ferramenta de corte.

O método analítico para a solução do problema de estimar o campo térmico na superfície de contato cavaco-ferramenta é trabalhado através de um Método Inverso, que é um recurso matemático para encontrar uma variável de causa de um fenômeno, através de dados de consequências deste. Isso ocorre através da programação em MATLAB da técnica da Função Especificada Sequencial, que utiliza valores experimentais de medição para comparação e convergência da solução numérica final. No presente estudo, essa comparação é feita através da linguagem MATLAB conectada ao *software* COMSOL, que gera resultados de temperatura a partir de um fluxo estimado, compara o resultado térmico ao obtido experimentalmente, utiliza o resultado da comparação como base para ajustar o fluxo de calor utilizado na iteração anterior do algoritmo, sendo este fluxo ajustado e testado novamente na próxima iteração. Considerando as limitações do processo de torneamento e possibilidades de solução, este estudo elabora uma tratativa para a pergunta problema proposta.

Como estimar o fluxo de calor na região de contato entre o cavaco e a ferramenta no processo de torneamento por meio da técnica de problemas inversos?

1.2 Justificativa

Os métodos de soluções numéricas são de fundamental relevância para a indústria, por tornar possível a previsão de eventos multifísicos com relativa precisão, como mencionado em Silva (2021). Assim, possibilita a experimentação de parâmetros e materiais, otimização de processos, devido ao baixo custo de execução, rápida realização de testes, adaptação de parâmetros e precisão considerável, como analisa HU *et al.*, (2014). Também podem ser utilizados para comparação e avaliação de fatores de erro entre os diferentes métodos de solução para o problema de estimar o fluxo de calor no processo de torneamento, como o experimental, experimental-analítico e soluções numéricas. A partir do estudo de condições favoráveis de operação para cada situação de usinagem, testes, estudos numéricos, e

adaptações do modelo térmico, parâmetros de usinagem mais seguros e rentáveis podem ser determinados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Propor solução numérica para estimar o fluxo de calor na zona de contato entre o cavaco e a ferramenta no processo de torneamento.

1.3.2 Específicos

- Realizar um estudo teórico sobre: usinagem, torneamento, distribuição de campo térmico no processo, condições de contorno, modelos de solução e métodos inversos;
- Analisar o problema de medição de temperatura na superfície de contato cavaco-ferramenta, assim como seus instrumentos e métodos de medição. Especificar os métodos analíticos ou matemáticos e experimentais para solução do problema. Explorar os Métodos Direto e Inverso e a Função Especificada Sequencial para estimar o fluxo de calor;
- Desenvolver modelo térmico coerente com as condições de contorno envolvidas na medição experimental. Aplicar o modelo ao Método Inverso através do algoritmo computacional da Função Especificada Sequencial para estimar o fluxo de calor. Utilizar os dados de ensaios experimentais para a formulação da Função Especificada Sequencial para solução do problema;
- Comparar e analisar os resultados obtidos numericamente com os obtidos experimentalmente, avaliando o tempo de geração de resultados e o erro residual.

1.4 Estrutura do Trabalho

Introduzido o problema nessa seção, ele será mais profundamente abordado no próximo capítulo, onde foram analisados trabalhos realizados na área e métodos e soluções utilizadas pela indústria e setor de pesquisa e desenvolvimento modernos. A partir dos resultados analisados de diversos trabalhos realizados no setor, no terceiro capítulo é desenvolvido um modelo numérico para análise de parâmetros e a partir dele, obtida uma solução numérica para gerar o campo térmico envolvido em um sistema específico, de um suporte de ferramenta, a ferramenta de corte e a região próxima à área de corte. Em seguida são

analisados os resultados obtidos desse método e comparados aos resultados provenientes de uma medição experimental, realizada em laboratório. Essa análise pode contribuir para o entendimento das limitações de cada processo, como abordado mais profundamente nas conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Usinagem Mecânica e Campo Térmico

A usinagem é um dos processos mais utilizados de manufatura. Contudo, o processo de corte de metal ainda não é completamente entendido pelo estado da arte dos campos de deformações e de temperatura em determinadas situações inerentes a esse processo, como sintetiza Figueiredo *et al.* (2022). Ressalta-se que o estudo da influência da temperatura no processo de usinagem começou há muitos anos e ainda é tema de enfoque das pesquisas atuais. A complexidade desse estudo se deve principalmente à dificuldade para se medir com precisão o campo térmico na região de contato do cavaco com a ferramenta nos processos de usinagem.

O estudo mencionado utiliza como solução para caracterização do campo térmico nessa região de contato, dois métodos numéricos, a princípio: o Método Direto e o Método Inverso, considerando que o segundo pode ser utilizado em problemas que não podem ser solucionados pelo primeiro. Para a modelagem do problema nos modelos térmicos computacionais, é necessária a definição analítica das condições de contorno atuantes no problema real.

2.2 Condições de Contorno

Para caracterizar as condições de contorno no problema de usinagem por torneamento, é necessário considerar três zonas de cisalhamento: primária, secundária e terciária, com condições próprias em cada. A geração de calor e o campo térmico nessas regiões, dependem de parâmetros como a velocidade de corte, profundidade de corte, características da geometria da ferramenta, propriedades dos materiais da peça e da ferramenta, propriedades do revestimento (caso possua), entre outros. Santos *et al.* (2014) analisa e compara os efeitos desses parâmetros de corte na temperatura na região de corte, através do Método Inverso. Ferreira (2017) compara os efeitos térmicos do uso de cerâmica como revestimento para ferramentas de torneamento, através de estudos numéricos com o *software* COMSOL. Como mostra esse trabalho, o revestimento isolante tende a aumentar a temperatura na zona de contato da peça com a ferramenta, sendo necessário atentar as consequências desse fenômeno.

Carvalho *et al.* (2006) desenvolveram o Método Direto através da equação tridimensional de difusão de calor em regime transiente (Eq. 1):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_i \frac{\partial T}{\partial z} \right) = (\rho C_p)_i \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Considerando as seguintes condições de contorno:

- Às superfícies expostas ao ambiente aplica-se a Equação 2, representando a perda de calor por convecção e Equação 3, representando o efeito da radiação:

$$-k_i \frac{\partial T}{\partial \eta} = h(T - T_\infty) \quad (2)$$

$$-k_i \frac{\partial T}{\partial \eta}(x, y, z, t) = \sigma \varepsilon(T) (T^4 - T_\infty^4) \quad (3)$$

- Na interface de contato cavaco-ferramenta (Equação 4):

$$-k_i \frac{\partial T}{\partial \eta} = h(T - T_\infty) \quad (4)$$

- A pesquisa descrita em Figueiredo *et al.* (2022) analisa a distribuição de temperatura na ferramenta de corte e no suporte da ferramenta, descrita pela Equação 5:

$$\nabla(k \nabla T) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

Onde $T=T(x,y,z,t)$ é a função de temperatura, k é o coeficiente de condutividade térmica, ρ é a densidade, C_p é o calor específico, e t o tempo.

2.3 Modelo de Solução

Nota-se a configuração de soluções híbridas para o estudo da geração do campo térmico no processo de torneamento. Diversos estudos utilizam a combinação de técnicas como soluções matemáticas analíticas ou numéricas e medições experimentais, como mostra a Figura 1:

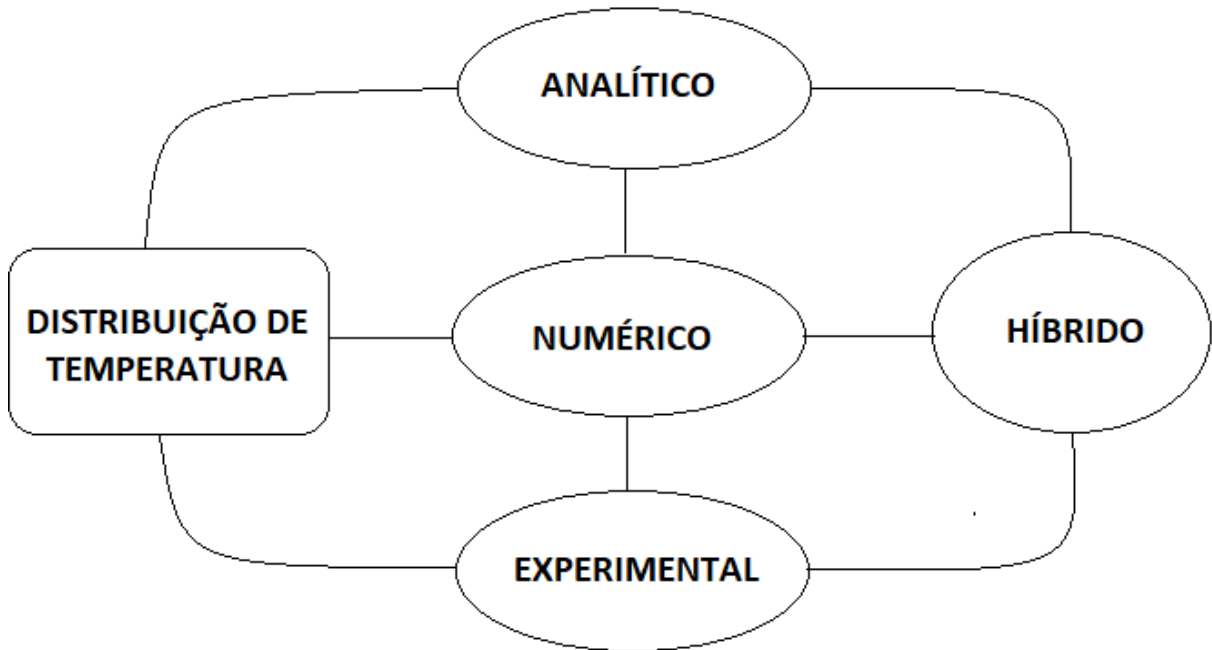


Figura 1 – Métodos Utilizados para Distribuição de Temperatura
 Fonte: Adaptado de Figueiredo et al. (2022)

Os métodos podem se complementares, utilizando em um, dados provenientes de outro método, devido aos diferentes mecanismos de obtenção de dados desses métodos.

2.4 Método Inverso

Diversas técnicas numéricas inversas podem ser acopladas aos modelos térmicos para otimizar a solução, como *Simulated Annealing*, Seção Áurea e Função Especificada Sequencial, como se analisa em Santos *et al.* (2014). Os critérios que diferenciam os métodos são, principalmente, dificuldade de implementação das técnicas inversas, o tempo computacional e a taxa de erro da comparação entre o resultado matemático e o experimental.

Estes mesmos autores expõem as técnicas inversas, fazendo uma relação entre elas quanto a seus respectivos erros médios residuais, resultantes da comparação entre os resultados da técnica utilizada e resultados medidos experimentalmente, através da Tabela 1.

Tabela 1 – Técnicas Inversas por resíduo

<i>Ranking</i>	Técnica Inversa	Resíduo Médio $[\frac{W}{m^2}]$
1°	<i>Simulated Annealing</i> (SA)	130,10
2°	Seção Áurea (GS)	138,10
3°	Função Especificada Sequencial (Func-Esp)	244,70
4°	Observadores Dinâmicos (Obser-Din-Green)	297,37

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2014)

Também foi analisado nesse trabalho, o tempo computacional de cada técnica, em um ranking similar elaborado na Tabela 2:

Tabela 2 - Técnicas Inversas por tempo

<i>Ranking</i>	<i>Técnica Inversa</i>	<i>Tempo [min]</i>
1°	Função Especificada Sequencial e Observadores Dinâmicos	2
2°	Seção Áurea (GS)	36
3°	<i>Simulated Annealing</i>	37

Fonte: Santos et al. (2014)

Observa-se na Tabela 2, que no roteiro de aplicação das técnicas comprovadamente mais assertivas como Seção Áurea e *Simulated Annealing*, o Problema Direto é solucionado diversas vezes para estimar o comportamento do fluxo de calor com mais precisão. De forma mais simplificada, a Função Especificada Sequencial e a Técnica de Observadores Dinâmicos solucionam o Problema Direto apenas uma vez, diminuindo drasticamente a necessidade de recursos computacionais para solução do problema geral.

Em Custódio (2016) é utilizada a técnica inversa da Seção Áurea para estimar o fluxo de calor do problema. Esse método se destaca dentre os demais em função da facilidade para implementação de técnicas inversas e de ajuste de parâmetros, como mostra Santos *et al.* (2014). Além disso, Custódio (2016) ressalta outras vantagens da técnica, como a possibilidade de resolução de funções com mais de uma variável e a taxa de convergência conhecida. Contudo, aponta também o alto custo computacional do processo.

Portanto, uma das técnicas inversas mais utilizadas é a Função Especificada Sequencial, devido à relação de tempo computacional e resíduo médio favorável. Além disso, em comparação com as demais, é uma técnica de fácil implantação do Método Inverso e fácil ajuste de parâmetros, facilitando os fins investigativos através de seu uso.

Portanto, o Método Direto é utilizado quando se dispões das informações de parâmetros e condições de contorno que caracterizam o fluxo de calor e o campo térmico. Caso não sejam conhecidos parâmetros como o fluxo de calor, é necessária a utilização do Método Inverso para encontrar o fluxo. Como comenta Ferreira (2017) o Método Inverso pode ser aplicado através da Função Especificada Sequencial para estimar o fluxo de calor, a partir do roteiro:

1. Estimativa inicial do fluxo de calor;
2. Solução do problema de geração do campo térmico utilizando valor vigente do fluxo de calor;

3. Cálculo do coeficiente de sensibilidade (X), que é a derivação da temperatura de determinada região pelo gradiente de fluxo de calor daquela região, através da Equação 6:

$$X(x, y, z)_{M+i-1} = \frac{\partial T(x, y, z)_{M+i-1}}{\partial q_M} \quad (6)$$

4. Comparação do campo térmico gerado numericamente (T) e calculado a partir de medições práticas (Y), como mostra Ferreira (2017) através da Equação 7:

$$\Delta q_M = \frac{\sum_{i=1}^r (Y_{M+i-1} - T_{M+i-1}^*) \cdot X_{M+i-1}}{\sum_{i=1}^r X_{M+i-1}^2} \quad (7)$$

5. Redução do valor de Δq_m , essa variável mede a variação do valor do fluxo de calor utilizado na iteração vigente do algoritmo com o valor calculado a partir de medições experimentais. q representa o fluxo de calor, M representa a posição atual do sensor de temperatura, r a posição futura;
6. Teste residual do valor de Δq_m obtido. Em Ferreira (2017) o critério especificado pela Equação 8:

$$\frac{(q_M - q_M^*)}{q_M} \leq 10^{-4} \quad (8)$$

- a. Caso o resultado residual encontrado seja inferior ou igual ao critério, o valor final do fluxo de calor foi estimado e o loop é interrompido;
- b. Caso seja superior, o valor de q_m é recalculado, através da Equação 9 e é feito o regresso ao passo 2 desse roteiro, repetindo o loop até o resultado satisfazer o critério de redução:

$$q_M = q_M^* + \Delta q_M \quad (9)$$

7. Adota-se o valor final de q_m como estimativa inicial para o valor de q_{m+1} . É feito o regresso ao passo 2 desse roteiro, repetindo o *loop* até que sejam feitas todas as

convergências, segundo o critério de redução, para todas as posições (M, M+1, M+2, ..., M+N) da superfície de contato entre o cavaco e a ferramenta.

Pode-se perceber então que a correta formulação do método da Função Especificada Sequencial apresenta grande economia de tempo computacional (cerca de 18 vezes menos, comparado a maioria dos métodos utilizados, conforme Santos et al. (2014)), paralelo a um relativamente pequeno aumento do erro residual (cerca de duas vezes, em comparação com a maioria dos métodos analisados).

3 METODOLOGIA

3.1 Tipo de Pesquisa

Segundo Lakatos e Marconi (1992), a metodologia refere-se à sistematização do método para utilizar procedimentos lógicos e matemáticos como solução para o problema em questão, validados a partir de teorias científicas.

A pesquisa aqui desenvolvida enquadra-se em caráter descritivo, por prestar como solução a descrição matemática de um fenômeno reproduzido em laboratório. Para Gil (2009), as pesquisas deste tipo objetivam a descrição de determinado fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis. O processo de torneamento, analisado no presente trabalho, envolve diversas propriedades físicas da matéria e efeitos dinâmicos, como a geometria de cada componente sólido, parâmetros do material utilizado na ferramenta de corte e no suporte da ferramenta, o fluxo de calor, a condução do calor por todo o modelo sólido, a perda de calor por convecção, a influência da radiação, entre outros fatores. Esses fenômenos foram trabalhados por preceitos matemáticos, como o Método dos Elementos Finitos, implícito no *software* comercial COMSOL, para encontrar a distribuição do campo térmico e a Função Especificada Sequencial, uma técnica pertencente aos Métodos Inversos para estimar com precisão o fluxo de calor na interface de corte do material. A relação de todas as propriedades envolvidas nos fenômenos físicos com os métodos matemáticos aqui desenvolvida, dá origem à simulação computacional e análise numérica.

É ressaltado em Gil (2009), que a análise das informações nas pesquisas experimentais e nos levantamentos é essencialmente quantitativa. Esta investigação se orienta a esta abordagem de processo, tendo como enfoque a redução do erro residual do modelo numérico em comparação ao testado em laboratório. Essa redução ocorreu paralelamente ao quanto a consideração de fatores físicos e dinâmicos desse processo se aproxima da totalidade dos fatores presentes no ensaio em laboratório. Também pode ocorrer com o aumento da complexidade dos métodos numéricos, representando com mais detalhes os fenômenos físicos, como a área de contato da ferramenta de corte com a peça que está sendo torneada.

Sob critérios técnicos, pode-se considerar essa monografia como um estudo de caso, considerando a comparação entre um caso testado experimentalmente, em laboratório, com um caso reproduzido por simulação numérica. comparação entre um caso testado experimentalmente, em laboratório, com um caso reproduzido por simulação numérica Também atua de forma experimental, ao se considerar o teste de parâmetros para melhora produtiva.

3.2 Materiais e Métodos

A **Error! Reference source not found.**2 ilustra o procedimento metodológico realizado na pesquisa e suas etapas.

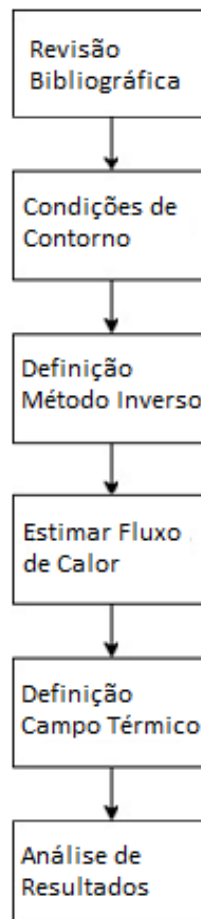


Figura 2 – Fluxograma do Procedimento Metodológico
Fonte: Pesquisa Direta (2023)

Como expõe a Figura 2, inicialmente foi realizada a revisão bibliográfica, construindo a base teórica para a correta elaboração da metodologia deste trabalho. Foram revisadas as especificações do processo de torneamento, quanto aos parâmetros e condições de controle foi

necessário definir as condições de contorno que seriam necessárias para reprodução numérica de um evento que foi realizado em laboratório.

A escolha do Método Inverso utilizado foi criteriosa, segundo as especificações do processo, sendo levado em conta o nível de complexidade de cada um, o tempo computacional necessário para cada estudo e o erro residual aceitável para essa análise.

Encontrado os parâmetros de fluxo de calor corretos para a interface cavaco-ferramenta, com a matemática implícita no *software* COMSOL, foi possível realizar a distribuição de temperatura ao longo da região estudada.

Finalmente, foram feitas as análises dos resultados obtidos, traçando o perfil e especificações do caso estudado.

3.3 Variáveis e Indicadores

Analisa-se em Lakatos e Marconi (2003) que uma variável pode ser definida como um conceito operacional, que contém ou apresenta valores, propriedade ou fator, discernível em um objeto de estudo e passível de mensuração.

Os indicadores são uma forma quantificável de representação das características de produtos e processos, utilizados para controlar e otimizar o desempenho dos mesmos.

Tabela 3 – Variáveis e indicadores utilizados

Variáveis	Indicadores
Método Numérico Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • Fluxo de calor • Distribuição de temperatura

Fonte: Pesquisa Direta (2023)

3.4 Instrumentos de Coleta de Dados

O presente estudo, teve como procedimento para sua realização, inicialmente, o entendimento dos fenômenos físicos influentes no evento, dos métodos matemáticos envolvidos no problema e dos recursos do *software* COMSOL. Fez-se necessário compreender o modelo físico do sistema original, com todo o equacionamento de

transferência de calor envolvido no evento experimental, para a aplicação dos parâmetros no *software*.

3.5 Formulação do modelo analítico

Para definir a distribuição de temperatura no torneamento deve-se considerar três zonas de cisalhamento: primária, secundária e terciária, considerando os efeitos térmicos relativos a cada uma. A Equação 1 define a condução de calor pela ferramenta, principalmente a partir do atrito gerado pelo contato entre a peça e a ferramenta. As Equações 2 e 3 definem a perda de calor por convecção e radiação, nas regiões expostas ao ambiente. Essas regiões compreendem toda a área superficial da ferramenta, com exceção da zona de contato.

A geração de calor e distribuição de temperatura nessas regiões dependem de parâmetros como a velocidade de corte, profundidade, geometria da peça e ferramenta e propriedades dos materiais de ambas, entre outros.

3.6 Formulação do modelo computacional

A geometria foi modelada usando uma ferramenta de corte de torneamento como referência, através do *software* SolidWorks. Essa geometria foi importada ao COMSOL, conforme ilustra a Figura 3, para ser analisada a distribuição de temperatura nessa ferramenta. Para os parâmetros químicos e físicos adotados para geometria, foram atribuídas as características da liga WC (Tungstênio e Carbono), com propriedades transientes para os coeficientes e parâmetros do material no COMSOL. Esse material foi escolhido para simular as propriedades do metal duro.

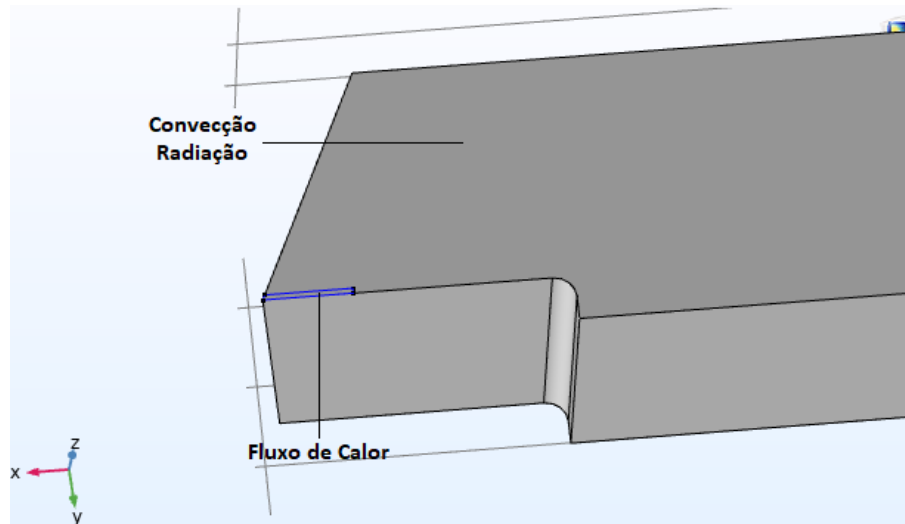


Figura 3 – Geometria e condições de contorno da ferramenta de corte
 Fonte: Pesquisa Direta (2023)

Como demonstrado na Figura 3, uma geometria foi importada, representando a ferramenta de corte no processo de torneamento e uma área determinada por um polígono foi considerada como a região de contato da peça com a ferramenta. Nessa simulação são considerados apenas a ferramenta de corte e o fluxo de calor gerado a partir do contato, portanto a peça em usinagem não é necessária para os cálculos.

O estudo de transferência de calor em sólidos foi selecionado e em seu escopo, são programados dois fluxos de calor, sendo um a entrada de calor no sistema, aplicado sob a área criada a partir do polígono, representando o fluxo de calor gerado na região de contato entre a peça e a ferramenta de corte, e o outro a perda de calor para o ambiente por convecção. A perda de calor por radiação não foi considerada neste estudo. O estudo é configurado para que tenha iterações a cada 1 segundo durante 240 segundos.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados da programação do MATLAB com o COMSOL

Em “*Datasets*”, um “*Cut Point 3D*” foi criado, para recuperar a temperatura gerada em uma posição selecionada, que no caso é a posição na qual o termopar foi acoplado, como ilustra a Figura 4.

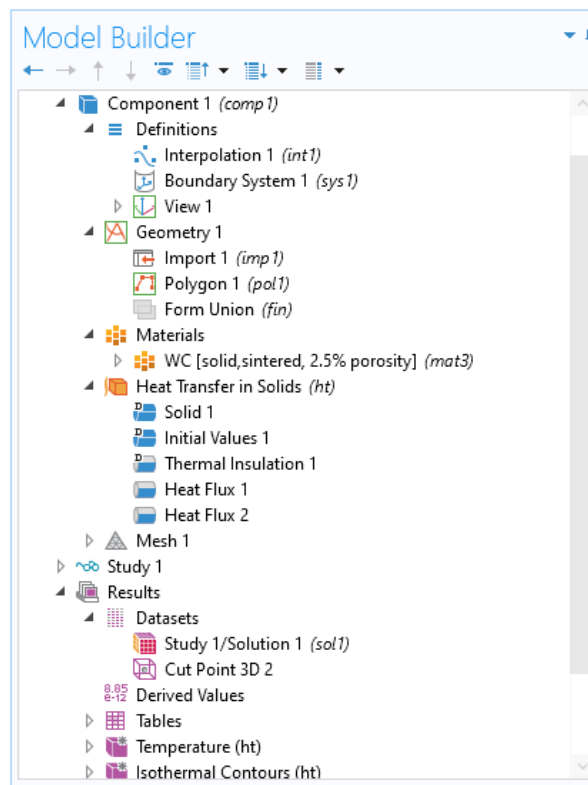


Figura 4 – Programação do software COMSOL.
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

O resultado de temperatura, gerado pela inserção do fluxo de calor inicial na programação do *software* COMSOL, demonstrada na Figura 4, foi exportado para um destino e carregado no *script* em MATLAB para comparação com a temperatura obtida de Kaminise (2012), ilustrada na Figura 5, obtida pelo termopar 3 (TC3).

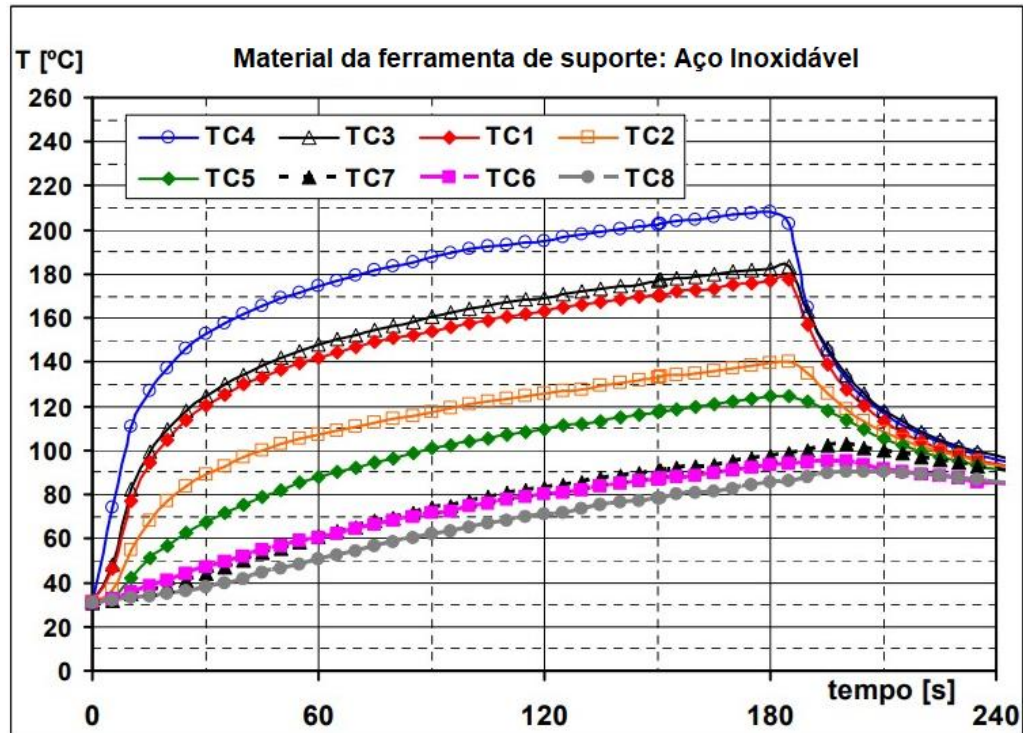


Figura 5 – Temperatura usada de referência (TC3).

Fonte: Kaminise (2012).

A diferença de temperatura resultante dos dois processos é considerada para recalcular o fluxo de calor em determinado momento pelo algoritmo. Essa diferença é multiplicada por uma matriz de sensibilidade, que foi gerada utilizando também o software COMSOL.

Para gerar a matriz de sensibilidade, foi considerado um fluxo de calor unitário-fracionário, que varia de 0 a 1. Esse fluxo foi criado a partir da criação de um “*Analytic*” em “*Definitions*” e formulando em sua expressão o fluxo de calor (no caso, inserido a partir da interpolação “*int 1*”), como exposto na Figura 4, dividido pelo valor máximo atingido pelo fluxo de calor (caso esse esteja em regime transiente, como o fluxo em questão). Portanto, a matriz de sensibilidade neste estudo foi determinada a partir de dados de tempo e valor da sensibilidade, obtida a partir do resultado de temperatura com a programação descrita no *software* COMSOL.

Além disso, foram zeradas (em graus celsius) as temperaturas iniciais dentro do campo “*ht*” e a temperatura externa considerada no fluxo por convecção, para obtenção dos coeficientes de sensibilidade, como expõe a Figura 6.

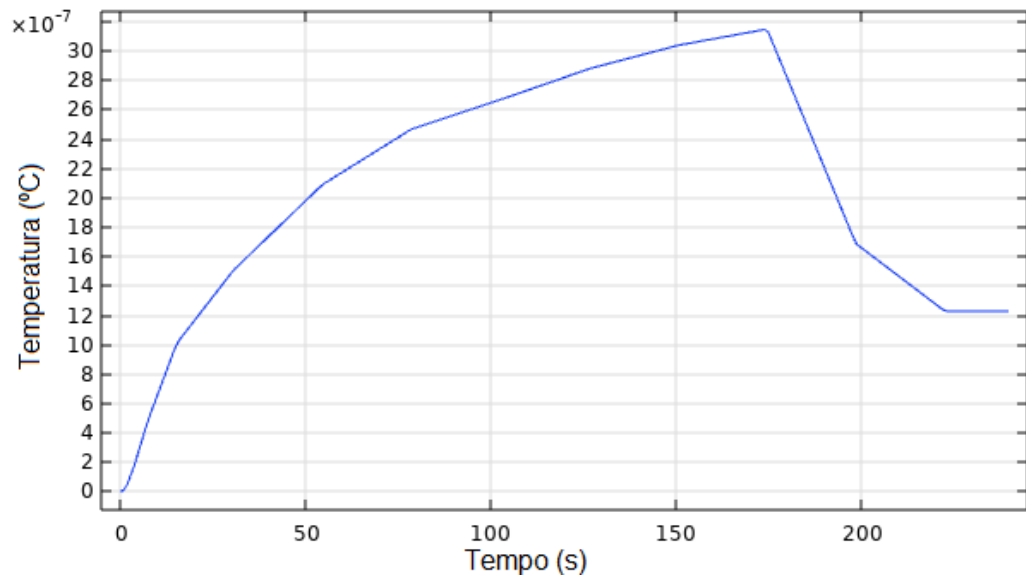


Figura 6 – Sensibilidade calculada pelo software COMSOL.
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

A multiplicação da diferença nas temperaturas na posição medida pelo TC3 pela matriz de sensibilidade gera um fator de correção para o fluxo de calor, recalculando o valor deste parâmetro no momento avaliado. A partir dessa formulação, obteve-se o fluxo de calor estimado para esse processo, utilizando 10 tempos futuros (r) no algoritmo para correção do parâmetro.

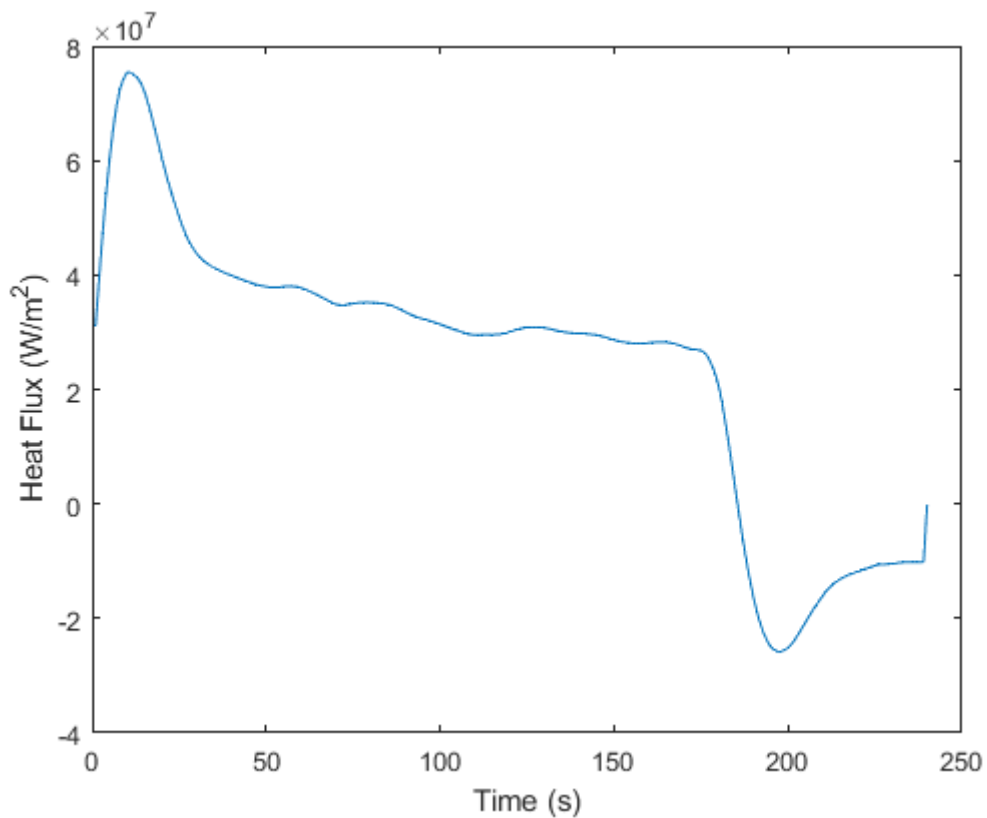


Figura 7 – Fluxo de calor estimado pelo algoritmo da Função Sequencial.
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

Este fluxo de calor estimado foi importado pelo software COMSOL, para gerar a temperatura calculada no ponto determinado (TC3) a partir deste parâmetro de fluxo de calor. O resultado da temperatura calculada foi plotado junto à temperatura utilizada de referência, para comparação.

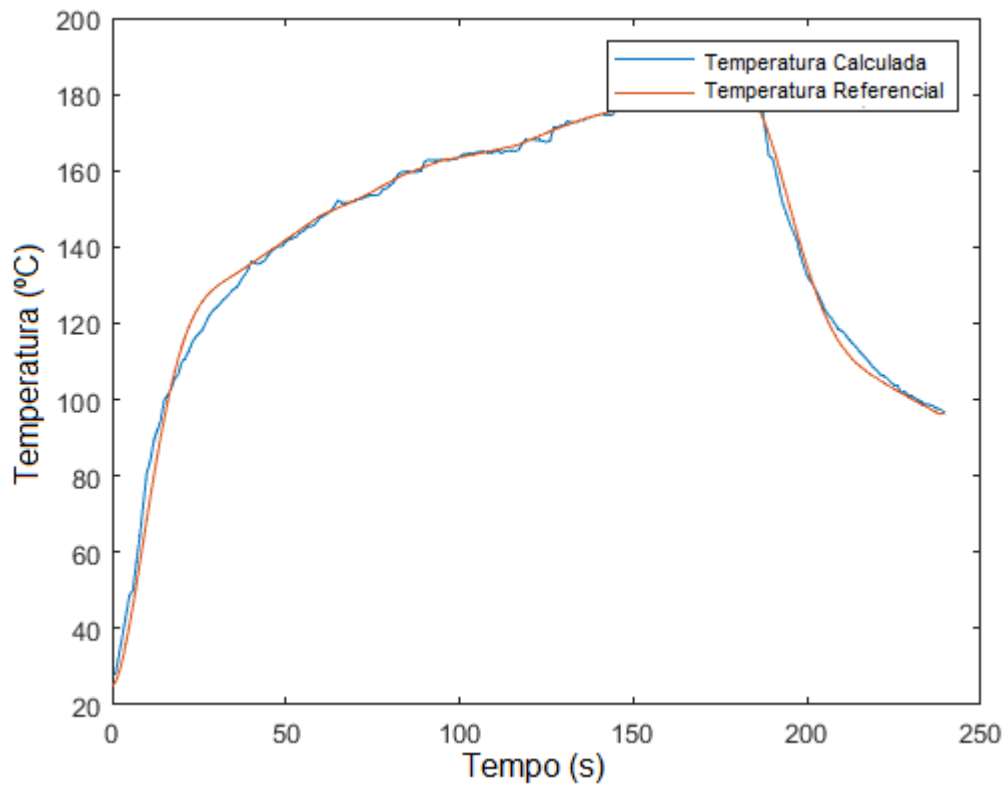


Figura 8 – Comparação entre a temperatura estimada e a usada de referência.
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

A Figura 8 foi obtida a partir da comparação da temperatura, obtidas de Kaminise (2012), com a temperatura proveniente do fluxo de calor gerado pelo algoritmo em MATLAB da Função Especificada Sequencial, considerando 10 tempos futuros (r). A partir da diferença de temperatura foi calculado o erro residual, na Figura 9.

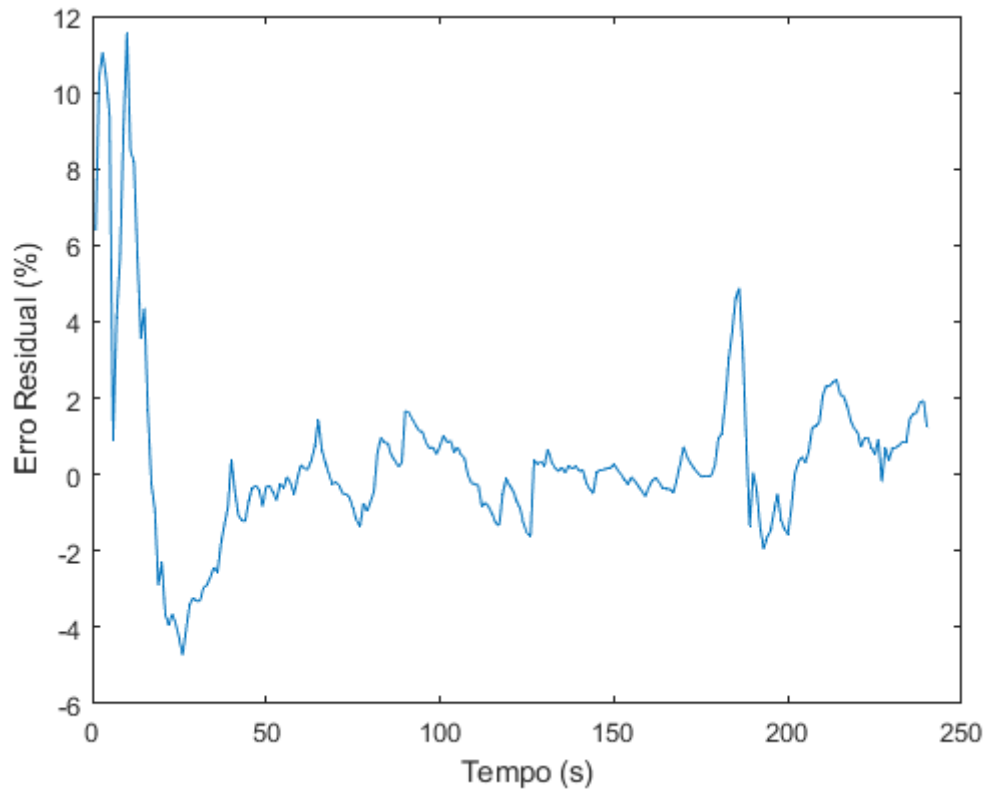


Figura 9 – Erro residual da comparação de temperatura.
Fonte: Pesquisa Direta (2023).

O cálculo de erros residuais entre a temperatura estimada computacionalmente e a medida experimentalmente apresenta alguns padrões devido à limitação do modelo matemático. Observa-se que nos primeiros momentos da análise, o erro individual assume seus maiores valores, devido à grande variação da temperatura nessa região e a dificuldade do método numérico utilizado para rápida adaptação do fluxo de calor e a variação expressiva nos valores de referência.

O método funciona a partir de discrepâncias entre resultados, portanto, é necessário antes detectar a diferença de temperatura nos resultados, para depois converter a solução para a desejada. Contudo, pode ser aprimorado, considerando detalhes mais específicos do processo de torneamento, como maior especificação da área de contato entre o cavaco e a ferramenta. Além disso, pode-se obter maior precisão, realizando um estudo completo de refinamento de malha e análise de parâmetros de configuração de iteração e tolerância admitida no software COMSOL.

5 CONCLUSÃO

Considerando as análises feitas a partir dos gráficos de comparação do fluxo de calor estimado e do usado de base, do erro residual do método, do tempo de processamento e da modelagem computacional do sistema, obteve-se confirmação da eficiência do método numérico utilizado.

Paralelamente, foi observada alta precisão do método após a correta configuração dos parâmetros de programação do COMSOL e do MATLAB, sendo calculado um erro máximo inferior a 12% na comparação entre a temperatura utilizada de referência e a calculada pelo *software* a partir do fluxo de calor estimado.

A consideração do percentual de erro pode ser justificada por uma limitação do método utilizado. Os Métodos Inversos, incluindo a Função Especificada Sequencial, possuem menor precisão ao estimar fluxos de calor transientes, nos períodos de grande variação. Estes também contam com a perda de precisão nos momentos finais da análise, devido à impossibilidade de calcular a quantidade de tempos futuros estipulados nestes momentos.

Finalmente, considerando a baixa taxa de erro do método, pode ser constatado que a função numérica apresenta uma solução viável para a análise do fenômeno de torneamento, visto que pode alcançar relativa precisão com baixa utilização de recursos computacionais, reduzindo drasticamente o custo com recursos como equipamentos, trabalhadores e tempo despreendido em físicos.

5.1 Recomendações

A elaboração desse estudo é limitada em diversos parâmetros, devido à complexidade de considerar todas as variáveis do problema real na modelagem numérica, do sistema físico do processo de usinagem, que limita a medição de dados em determinadas regiões, e da limitação do método inverso utilizado relativa aos tempos futuros no momentos finais da simulação.

Pesquisas mais recentes na área abordam o estudo de tempos futuros (r) para aumentar a precisão do método. Esse estudo pode ser feito aliado a um estudo de iterações de processamento do software de simulação utilizado para melhor eficácia.

Além disso, diversos estudos atuais apontam para a análise da área de contato na superfície de corte peça-ferramenta. Apesar desta muitas vezes ser representada pelos

parâmetros de profundidade e avanço, depende também de outros fatores intrínsecos ao processo de usinagem.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FIGUEIREDO, Alisson A. A.; GUIMARÃES, Gilmar; PEREIRA, Igor Cezar. **Heat flux in machining processes: a review**. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08720-4>

CARVALHO, S. R. *et al.* **Temperature determination at the chip–tool interface using an inverse thermal model considering the tool and tool holder**. In: Journal of Materials Processing Technology 179 (2006) 97–104, doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.03.086

FERREIRA, Diego Corrêa. **Análise Numérica da Influência Térmica dos Revestimentos em Ferramentas de Corte Usando o Programa COMSOL e Problemas Inversos**. Itajubá, 2017. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade de Itajubá, 2017.

SANTOS, Marcelo Ribeiro dos *et al.* **Analyses of Effects of Cutting Parameters on Cutting Edge Temperature Using Inverse Heat Conduction Technique**. In: Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering Volume 2014, Article ID 871859, 11 pages.-30x <http://dx.doi.org/10.1155/2014/871859>.

SILVA, R. G. D. da *et al.* **Simultaneous real time estimation of heat flux and hot spot temperature in machining process using infrared camera**. In: Case Studies in Thermal Engineering 28 (2021) 101352, Laboratório de Transferência de Calor - LabTC, Instituto de Engenharia Mecânica - IEM, Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Campus Prof. José Rodrigues Seabra, Av. BPS, 1303, 37500-903, Itajubá, MG, Brazil.

HU, Yanjuan *et al.* **Temperature Field Numerical Analysis of Machining Process Based on the Finite Element Analysis**. In: Key Engineering Materials Vol 621 (2014) pp 611-616. Trans Tech Publications, Switzerland, 2014. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.621.611.

CUSTÓDIO, Caroline. **TÉCNICAS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR REVERSA**. . Dissertação (Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecânica) Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Cornélio Procópio, 2016.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andreade. **Metodologia do Trabalho Científico**. 4ª ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 1992.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6ª ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2009.

KAMINISE, Almir Kazuo. "Estudo da influência do material do porta-ferramenta sobre temperaturas de usinagem no torneamento." (2012).