

VITOR HENRIQUE DE MENDONÇA OLIVEIRA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA TÉRMICA DO
REVESTIMENTO EM FERRAMENTAS DE CORTE DE
METAL DURO: OBTENÇÃO DE FLUXO DE CALOR E
DA TEMPERATURA NA INTERFACE PEÇA-
FERRAMENTA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2024

VITOR HENRIQUE DE MENDONÇA OLIVEIRA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA TÉRMICA DO REVESTIMENTO EM
FERRAMENTAS DE CORTE DE METAL DURO: OBTENÇÃO DE
FLUXO DE CALOR E DA TEMPERATURA NA INTERFACE PEÇA-
FERRAMENTA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Gilmar Guimarães
Coorientador: Prof. Dr. Marcio Bacci da Silva.

Uberlândia - MG
2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

O48 Oliveira, Vitor Henrique de Mendonça, 1997-
2024 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA TÉRMICA DO REVESTIMENTO EM
FERRAMENTAS DE CORTE DE METAL DURO: [recurso
eletrônico] : OBTENÇÃO DE FLUXO DE CALOR E DA
TEMPERATURA NA INTERFACE PEÇA-FERRAMENTA / Vitor
Henrique de Mendonça Oliveira. - 2024.

Orientador: Gilmar Guimarães.
Coorientador: Márcio Bacci da Silva.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.547>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Guimarães, Gilmar, 1960-,
(Orient.). II. Silva, Márcio Bacci da, 1964-,
(Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia.
Pós-graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanica.ufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica			
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 649, PPGEM			
Data:	29/07/2024	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:
Matrícula do Discente:	12212EMC010			
Nome do Discente:	Vitor Henrique de Mendonça Oliveira			
Título do Trabalho:	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA TÉRMICA DO REVESTIMENTO EM FERRAMENTAS DE CORTE DE METAL DURO: OBTENÇÃO DE FLUXO DE CALOR E DA TEMPERATURA NA INTERFACE PEÇA-FERRAMENTA			
Área de concentração:	Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos			
Linha de pesquisa:	Dinâmica dos Fluidos e Transferência de Calor			
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Problemas Inversos Aplicados em Engenharia Biomecânica, Processos de Fabricação e em Superfície de Materiais			

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva - FEMEC/UFU; Prof. Dr. Marcelo José Colaço - COPPE/UFRJ; Prof. Dr. João Marcelo Vedovotto - FEMEC/UFU e Prof. Dr. Gilmar Guimarães, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Gilmar Guimarães, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Gilmar Guimarães, Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/07/2024, às 08:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo José Colaço, Usuário Externo**, em 30/07/2024, às 10:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Marcelo Vedovotto, Professor(a) do Magistério Superior**, em 18/10/2024, às 14:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Bacci da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 18/10/2024, às 15:41, 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 https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5533202** e o código CRC **48AB2ADA**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Sirlene, ao meu pai Carlos, a minha irmã Ana Luiza, por todo apoio, paciência, carinho e amor a mim direcionados durante todo o caminho no mestrado, sem vocês não teria conseguido.

Ao meu orientador Gilmar Guimarães e ao professor Márcio Bacci, meu coorientador pelo conhecimento compartilhado e por terem me dado a oportunidade de trabalhar com uma grande referência da área de transferência de calor e outra da área de usinagem.

Aos meus amigos do mestrado, Guilherme e José Ricardo, pelas risadas, ajudas e experiências compartilhadas.

Aos colaboradores do LEPU, por todo o suporte durante os testes experimentais realizados no laboratório, em especial ao professor Éder.

E por fim, mas não menos importantes, aos amigos de uma vida toda, Douglas, Gabriel, Guilherme, Kassio e mais recentemente, Juliana, obrigado por tudo e principalmente por fazerem essa jornada ser mais leve.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pela oportunidade de realizar o Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica.

As agências de fomento Capes, Cnpq e Fapemig

E por fim, a todos que de alguma maneira, contribuíram para a minha formação acadêmica, meu sincero obrigado.

OLIVEIRA, V.H.M. **Análise da Influência Térmica do Revestimento em Ferramentas de Corte de Metal duro: Obtenção de Fluxo de Calor e da Temperatura na Interface Peça-Ferramenta.** 2024. 109f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

O presente estudo realizou uma análise comparativa da influência térmica do revestimento de nitreto de titânio (TiN) em ferramentas de corte de metal duro (WC-Co) durante a usinagem ortogonal de ferro fundido cinzento focado na estimativa do fluxo de calor e na determinação da temperatura na interface ferramenta-cavaco. Para obter a temperatura nos testes experimentais, foi realizado o torneamento do ferro fundido cinzento usando a ferramenta com e sem revestimento, em um total de 40 testes, sendo 20 para cada condição do substrato. Foi feita uma modelagem tridimensional do conjunto ferramenta e seu suporte, considerando as condições de contorno, onde o inserto é exposto a um meio convectivo, exceto na interface ferramenta-cavaco, onde parte do calor gerado flui para o inserto. A resistência térmica do conjunto devido à sua geometria complexa, justificou o uso de uma abordagem numérica para resolver o problema térmico. Para estimar o fluxo de calor, foram utilizadas a Inferência Bayesiana e o Teorema de Bayes, técnicas bem estabelecidas na resolução de problemas inversos em condução de calor. A estimativa do fluxo foi realizada com base na solução direta, utilizando duas técnicas: uma com variação temporal da propriedade termofísica e outra sem essa variação. Os dados experimentais mostraram que a ferramenta sem revestimento gerou temperaturas mais altas na interface de contato peça-ferramenta, apresentando uma diferença de aproximadamente 110°C a mais em comparação com as temperaturas geradas pelo inserto revestido. Para estimar o fluxo de calor utilizando a inferência bayesiana, foram realizadas 100 simulações para cada passo de tempo das temperaturas obtidas experimentalmente, considerando um fluxo aleatório em cada ensaio. Ao estimar o fluxo de calor constante ao longo do tempo, constatou-se a ineficácia dessa hipótese, pois o fluxo de calor varia durante a usinagem e não pode ser considerado permanente. Portanto, as simulações utilizando a segunda técnica, com fluxo de calor variável, mostraram-se adequadas e eficazes para o modelo térmico. Na estimativa do fluxo de calor variável, observou-se a influência do revestimento no modelo: os valores de fluxo para ambas as condições de teste seguiram a mesma tendência das temperaturas experimentais, com o fluxo para a ferramenta revestida sendo consideravelmente menor do que para o inserto sem revestimento. Este trabalho destaca a análise da influência do revestimento em ferramentas de corte como tribológica e uma contribuição importante para a solução de problemas inversos em condução de calor, especialmente em usinagem.

Palavras chaves: Transferência de calor. Problemas inversos. Condução de calor. Temperatura na Usinagem.

OLIVEIRA, V.H.M. **Analysis of the Thermal Influence of Coating on Carbide Cutting Tools:** Obtaining Heat Flux and Temperature at the Workpiece-Tool Interface. 2024. 109f. Master's thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

The present study carried out a comparative analysis of the thermal influence of titanium nitride (TiN) coating on carbide cutting tools (WC-Co) during orthogonal machining of gray cast iron focused on estimating the heat flow and determining the temperature at the tool-chip interface. To obtain the temperature in the experimental tests, gray cast iron was turned using the tool with and without coating, in a total of 40 tests, 20 for each substrate condition. A three-dimensional modeling of the tool assembly and its support was made, considering the boundary conditions, where the insert is exposed to a convective medium, except at the tool-chip interface, where part of the heat generated flows to the insert. The thermal resistance of the assembly, due to its complex geometry, justified the use of a numerical approach to solve the thermal problem. To estimate the heat flow, Bayesian Inference and Bayes' Theorem were used, well-established techniques for solving inverse problems in heat conduction. The flow estimation was carried out based on the direct solution, using two techniques: one with temporal variation of the thermophysical property and the other without this variation. The experimental data showed that the uncoated tool generated higher temperatures at the part-tool contact interface, presenting a difference of approximately 110°C more compared to the temperatures generated by the coated insert. To estimate the heat flow using Bayesian inference, 100 simulations were carried out for each time step of the temperatures obtained experimentally, considering a random flow in each test. When estimating the constant heat flow over time, this hypothesis was found to be ineffective, as the heat flow varies during machining and cannot be considered permanent. Therefore, simulations using the second technique, with variable heat flow, proved to be adequate and effective for the thermal model. In estimating the variable heat flux, the influence of the coating on the model was observed: the flux values for both test conditions followed the same trend as the experimental temperatures, with the flux for the coated tool being considerably lower than for the uncoated insert. This work highlights the analysis of the influence of coating on cutting tools as tribological and an important contribution to the solution of inverse problems in heat conduction, especially in machining.

Key Words: Heat transfer. Inverse problems. Heat conduction. Machining temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Zonas de Geração de calor na usinagem	2
Figura 2 - A ação da temperatura na dureza de materiais de ferramenta de corte	12
Figura 2.1- Esquema do processo de fabricação de pastilhas de metal duro	13
Figura 2.2 - Microestrutura do metal duro	13
Figura 2.3 - Classe e aplicação dos metais duros.....	14
Figura 2.4. Exemplo de uma pastilha de metal duro com três camadas de revestimento	15
Figura 2.5 - Medição de temperatura pelo método calorímetro.....	21
Figura 2.6 - Esquema de um circuito básico de termopar.....	22
Figura 2.7 - Esquema do método termopar ferramenta-peça	23
Figura 2.8 - Método do Termopar Implantado.....	24
Figura 2.9 - Influência do avanço nas temperaturas de corte. a) $f = 0.125 \text{ mm/rev}$; b) $f = 0.250 \text{ mm/rev}$; c) $f = 0,500 \text{ mm/rev}$	25
Figura 2.10 - Medição da temperatura de corte através do método da radiação infravermelha	27
Figura 2.11 - Experimento realizado por Kato (1976) para determinação da distribuição da temperatura no inserto	28
Figura 2.12 - Experimento para medição de temperatura pelo método PVD.....	28
Figura 2.13 - Temperaturas estimadas em insertos de cerâmica e metal duro	29
Figura 3 - Modelagem tridimensional do conjunto ferramenta (1) e suporte da ferramenta (2, 3)	33
Figura 3.1 - Condições de contorno aplicadas ao conjunto da ferramenta.....	34
Figura 3.2 - Condições de contorno aplicadas à ferramenta	34
Figura 3.3 - Malha usada para a solução do problema direto, em a) o conjunto completo, em b) detalhe da malha na aresta de corte e nos termopares.	36
Figura 3.4 - Temperatura estimada para um fluxo de 6.106 W/m^2	37
Figura 4 - Torno CNC Romi	45
Figura 4.1 - Programa CNC na linguagem ISSO	47
Figura 4.2 - Preparação dos discos a serem usinados com um bedame	48
Figura 4.3 - Imagem dos discos de ferro fundido preparados para a usinagem com a ferramenta de metal duro já montada.....	48

Figura 4.4 - Ferramenta revestida (a) e ferramenta sem revestimento (b)	49
Figura 4.5 - Ferramenta com os termopares do tipo K soldados (a). Termopares soldados (b).....	49
Figura 4.6 - Conjunto ferramenta, suporte da ferramenta e termopares	50
Figura 4.7 - Área de contato da ferramenta durante a usinagem do ferro fundido estimada em 5,507 mm ²	52
Figura 5 - Comportamento da temperatura experimental durante a usinagem com revestimento	54
Figura 5.1 - Temperatura experimental para diferentes posições dos termopares para o teste 1 com a ferramenta revestida.....	55
Figura 5.2 - Temperatura experimental para diferentes posições dos termopares para o teste 10 com a ferramenta revestida.....	56
Figura 5.3 - Comportamento da temperatura experimental durante a usinagem sem revestimento	58
Figura 5.4 - Temperatura experimental para diferentes posições dos termopares para o teste 1 com a ferramenta sem revestimento	59
Figura 5.5 - Temperatura experimental para diferentes posições dos termopares para o teste 10 com a ferramenta sem revestimento	59
Figura 5.6 - Comparação entre temperatura experimental com/sem revestimento	60
Figura 5.7 - Variação da Temperatura Máxima com revestimento	61
Figura 5.8 - Variação da Temperatura Máxima sem revestimento	61
Figura 5.9 - Perfil de fluxo estimado para a ferramenta com revestimento	63
Figura 5.10 - Comparação entre as temperaturas simuladas e experimentais na ferramenta revestida	64
Figura 5.11 - Comparação entre as temperaturas simuladas e experimentais na ferramenta sem revestimento	65
Figura 5.12 - Perfil do fluxo de calor estimado da ferramenta revestida no passo de 4 segundos.....	66
Figura 5.13 - Comportamento da temperatura da ferramenta revestida no passo de 4 segundos	67
Figura 5.14 - Perfil do fluxo de calor estimado da ferramenta revestida no passo de 8 segundos	67
Figura 5.15 - Comportamento da temperatura da ferramenta revestida no passo de 8	

segundos.....	68
Figura 5.16 - Perfil do fluxo de calor estimado da ferramenta revestida no passo de 11,25 segundos.....	68
Figura 5.17 - Comportamento da temperatura da ferramenta revestida no passo de 11,25 segundos.....	69
Figura 5.18 - Comportamento da temperatura da ferramenta revestida no passo de 10,5 segundos.....	70
Figura 5.19 - Comparação do comportamento das temperaturas do teste 1, média e reduzida.....	71
Figura 5.20 - Comparação do fluxo de calor das temperaturas do teste 1, média e reduzida.....	72
Figura 5.21 - Perfil do fluxo de calor estimado sem revestimento no passo de 4 segundos.....	73
Figura 5.22 - Comportamento da temperatura sem revestimento no passo de 4 segundos.....	73
Figura 5.23 – Perfil do Fluxo de calor estimado sem revestimento no passo de 8 segundos.....	74
Figura 5.24 - Comportamento da temperatura sem revestimento no passo de 8 segundos.....	75
Figura 5.25 - Perfil do fluxo de calor estimado sem revestimento no passo de 12 segundos.....	75
Figura 5.26 - Comportamento da temperatura sem revestimento no passo de 12 segundos.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de entrada utilizados no software para a ferramenta de corte...	36
Tabela 2 - Composição química do inserto de carboneto de tungstênio (WC-Co)..	44
Tabela 3 - Parâmetros utilizados para os experimentos	46
Tabela 4 - Posições dos termopares para os testes com revestimento de acordo com o eixo de coordenadas da Figura 3.2.....	50
Tabela 5 - Posições dos termopares para os testes sem revestimento de acordo com o eixo de coordenadas da Figura 3.2.....	51
Tabela 6 - Temperaturas obtidas nos testes experimentais para o termopar 3 (T3).	54
Tabela 7 - Amostra das temperaturas obtidas nos testes experimentais para o termopar 1 (T1).....	57
Tabela 8 - Fluxos estimados para cada passo de tempo para a ferramenta revestida.	
.....	70
Tabela 9 - Fluxos estimados para cada passo de tempo para a ferramenta sem revestimento	76

LISTA DE SÍMBOLOS

h	Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m ² . K]
k	Condutividade Térmica [W/mK]
α	Difusividade térmica [m ² /s]
$P(\beta Y)$	Função de densidade de probabilidade a posteriori (PPDF)
$P(Y \beta)$	Função de densidade de probabilidade
(PDF) $P(Y)$	Função de densidade de probabilidade marginal das medidas
$P(\beta)$	Função de densidade de probabilidade a priori
q''	Fluxo de calor [W/m ²]
T	Temperatura [°C]
K	Temperatura em graus Kelvin [K]
T_0	Temperatura Inicial [°C]
T^∞	Temperatura ambiente [°C]
t	Tempo [s]
x, y, z	Coordenadas retangulares [m]
Y	Temperatura Experimental [°C]

SUMÁRIO

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO	1
1.1. Organização do Trabalho.....	4
2. CAPÍTULO II: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Problemas Inversos em Condução de Calor.....	5
2.1.1. Técnicas para solução de problemas inversos	7
2.2. Ferramentas de Corte de Metal Duro e os Revestimentos.....	23
2.2.1 O revestimento de ferramentas de metal duro	14
2.3. Métodos para a Medição de Temperaturas.....	31
2.3.1 Métodos Calorimétricos	21
2.3.2 Método Termopar Ferramenta-peça.....	22
2.3.3 Método Termopar Implantado.....	24
2.3.4 Método da Inspeção Metalográfica	25
2.3.5 Método de Medição Utilizando Vernizes Termo Sensíveis	26
2.3.6 Método com Sensores Infravermelhos	26
2.3.7 Método de Medição com o Uso de Pós Químicos	27
2.3.8 Método do filme PVD.....	28
2.3.9 Métodos Analíticos e Numéricos para Determinação da Temperatura de Corte	29
CAPÍTULO III: FUNDAMENTOS TEÓRICOS	32
3.1 Problema Direto.....	32
3.1.2 Solução Numérica: Discretização	36
3.2 Problema Inverso	38
3.2.1 A Inferência Bayesiana.....	39
3.2.2 Estimativa do Fluxo de Calor	42
3.2.3 Modelo térmico 1: Hipótese de fluxo de calor constante durante todo o torneamento	42
3.2.4 Modelo térmico 2: Fluxo de calor variável com o tempo na interface de corte peça-ferramenta	43
CAPÍTULO IV: METODOLOGIA	44
CAPÍTULO V: RESULTADOS.....	53
5.1 Resultados Experimentais	65
5.2 Estimativa Inicial do Fluxo de Calor.....	74
5.3 Estimativa Final do Fluxo considerando a sua Variação Temporal.	77
Temporal	65
CAPÍTULO VI: CONCLUSÃO	78
6.1 Perspectivas Futuras	79
REFERÊNCIAS	80

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Dentre os variados processos de fabricação existentes, destaca-se a usinagem como um dos principais meios de produzir peças e equipamentos. Ferraresi (1970), define usinagem como operações de retirada de material, o cavaco, para gerar forma, alterar dimensões e dar acabamento a diferentes tipos de peças. Apesar de popular, não é simples o controle dessa técnica pelo grande número de variáveis inerentes à essa tecnologia. Entretanto, uma vez mapeadas essas condições, o processo deixa de ser complexo e passa a ser muito viável (Machado; et al, 2015).

A temperatura é uma propriedade que influencia de maneira direta ou indireta em outras variáveis durante o processo de usinagem e na determinação de parâmetros, como no tipo de ferramenta de corte a ser usado, no uso ou não de lubrificantes, na velocidade de corte, no avanço, na profundidade de corte, na rugosidade média e consequente acabamento superficial, além de afetar a vida útil da ferramenta, podendo aumentar o seu desgaste (Barzegar e Ozlu, 2021, apud David, J.P.C; et al, 2022). Para Costa e Silva (2015), a temperatura ainda pode ser um parâmetro para avaliar a usinabilidade de metais.

O calor gerado durante a usinagem traz problemas para o processo, como acelerar os mecanismos de desgaste e promover a redução da tensão de escoamento nas ferramentas de corte, porém, esse mesmo calor gerado pode ajudar a reduzir a resistência mecânica do material da peça, contribuindo para a formação do cavaco. Já Carvalho, Abrão e Rubio (2004) complementam essa ideia no sentido de que grandes temperaturas geradas durante o processo de usinagem comprometem a resistência da ferramenta, o aumento do desgaste e gera modificações nas tolerâncias dimensionais da peça usinada.

Diante dessa influência, torna-se necessário o controle de tal variável para o processo. Tensões e deformações são geradas devido ao contato entre a peça e a ferramenta. Grande

parte dessas deformações são convertidas em calor, implicando em uma zona de alta temperatura na região de contato peça-ferramenta-cavaco (Ferraresi, 1977).

A geração de calor na formação de cavaco durante a usinagem é representada na Figura 1. De forma a contribuir para o controle da temperatura e dos efeitos tribológicos decorrentes do processo de usinagem em si, existe a opção de utilizar ferramentas texturizadas ou revestidas. Este último, auxilia na melhora da resistência do desgaste, aumenta a difusão de calor devido ao atrito do movimento relativo que caracteriza a usinagem, gerando um controle maior da temperatura e promovendo um aumento da vida útil da ferramenta de corte (Santos Junior, 2022).

Do ponto de vista térmico, tão importante quanto o controle da temperatura gerada no processo, é a medição de propriedades térmicas, cujas aplicações não se restringem apenas a usinagem, abrangendo processos de fabricação até a medicina em geral (Santos Junior; et al., 2022).

Porém, se tratando de revestimentos em ferramentas de corte, a medição de tais propriedades esbarra na fina camada de material acrescido à ferramenta, dificultando a medição, o que nos leva a utilizar diferentes métodos para estimar tais características, como é o caso da condutividade térmica.



Figura 1 - Zonas de Geração de calor na usinagem. Fonte: Machado; et al (2015b).

Na Figura 1 estão expostas três regiões de geração de calor pela interação ferramenta-peça. Em A, a zona primária de cisalhamento, em B e C a zona de cisalhamento secundária e em D, a zona terciária de cisalhamento (Machado; et al, 2015c). Na zona primária, a maior parte do calor gerado é dissipado pelo material removido, o cavaco e uma pequena parcela

de calor é transferida para a peça, razão pela qual podem surgir problemas dimensionais na peça usinada.

Já a zona secundária, é a responsável pelo aumento da temperatura da ferramenta de corte pelo contato da interface cavaco-ferramenta, acelerando os mecanismos de desgaste e reduzindo o limite de escoamento das ferramentas. Por fim, a zona terciária de cisalhamento surge se o ângulo de folga, da ferramenta de corte, durante a usinagem for pequeno ou se o desgaste de flanco, causado pelo contato entre a ferramenta e a peça, for considerável Machado e Silva (2004).

A partir do conhecimento do que pode resultar a falta de controle da temperatura na usinagem e das dificuldades de medição e estimativa de propriedades termofísicas de ferramentas revestidas ou texturizadas, várias pesquisas foram desenvolvidas utilizando diferentes tipos de procedimentos para determinação desses dados, como técnicas numéricas (método de elementos finitos, métodos inversos em condução de calor), técnicas analíticas (modelagem uni, bi ou tridimensional) e técnicas experimentais (método termopar ferramenta-peça) (França, 2021).

Machado e Silva (2004b) indicam que várias dessas técnicas são aplicadas para medir a temperatura na usinagem e apesar de satisfatórias, nenhuma delas é considerada absoluta e universalmente aceita. Os autores ainda citam técnicas para medições como método do termopar ferramenta-peça, este utilizando o efeito Seebeck e a medição direta por inserção de termopares em diferentes posições da peça a ser usinada. O presente trabalho irá explorar esses e outros tipos de medições e realizar testes utilizando a segunda técnica de medição.

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência térmica do revestimento de uma ferramenta de corte de metal duro em um processo de usinagem ortogonal. Assim, este projeto apresenta uma contribuição ao estudo dos campos térmicos decorrentes de um corte ortogonal, com o objetivo de analisar a parte de geração de calor que ocorre na interface de corte que se difunde para a ferramenta e o efeito que a presença dos revestimentos das ferramentas produz no campo térmico da ferramenta.

Para isso será utilizado técnicas de problemas inversos como o Teorema de Bayes e a Inferência Bayesiana. Serão comparadas temperaturas simuladas a partir da modelagem tridimensional do modelo desenvolvido no software COMSOL, com temperaturas experimentais obtidas durante processos de usinagem ortogonal. O uso desta comparação juntamente com a Inferência Bayesiana permite a obtenção do fluxo de calor entregue à ferramenta e a consequente obtenção do campo térmico da ferramenta, incluindo a evolução de temperatura na interface de corte.

1.1. Organização do Trabalho

Após a introdução e apresentação dos objetivos deste trabalho, no capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica de técnicas de otimização, diferentes métodos de solução de problemas inversos aplicados a condução calor envolvendo a usinagem, além diferentes técnicas de medição de temperatura durante processos de fabricação, especialmente no torneamento.

No capítulo 3 são desenvolvidos o problema direto e a modelagem tridimensional do conjunto ferramenta e suporte da ferramenta, alvos do estudo, além do método de problema inversos que será utilizado para estimativa do fluxo de calor, a Inferência Bayesiana e o Teorema de Bayes.

Apresenta-se no capítulo 4 o aparato experimental para a obtenção das temperaturas durante o processo de torneamento da peça de ferro fundido cinzento, demonstrando toda a preparação das amostras e da ferramenta com e sem revestimento e a estimativa da área de contato onde o fluxo de calor do processo é entregue a ferramenta.

Apresenta-se no capítulo 5 os resultados experimentais obtidos durante os procedimentos descritos no capítulo 4 e são demonstrados os resultados simulados para a solução dos problemas inversos em condução de calor. E, por fim, apresenta-se no capítulo 6 as conclusões e principais contribuições deste trabalho, assim como as perspectivas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os problemas inversos em condução de calor e faz uma breve revisão sobre as suas técnicas de solução, assim como pesquisas propostas com este tema. Apresenta-se também, uma contextualização a respeito dos revestimentos e métodos para a medição de temperatura na usinagem.

2.1. Problemas Inversos em Condução de Calor

Os métodos de solução de problemas inversos em condução de calor podem ser definidos como uma maneira de determinar, através da observação de efeitos, a causa ou o que causou certo tipo de efeito (Lima, 2001). Por exemplo na usinagem, a possibilidade de determinar as propriedades térmicas (causas), como o fluxo e a geração de calor, além da condutividade, de uma parte de uma peça ou ferramenta que tenha acesso restrito, através da análise da temperatura (efeito) em um local que não esteja obstruído. Fato este que não ocorre com problemas diretos, que já possuem dados conhecidos para as propriedades termofísicas (causas) o que permite estimar a temperatura (efeitos) (Fernandes; Dos Santos; Guimarães, 2015).

Os problemas inversos aplicados à condução de calor então propõem a solução de problemas físicos indiretamente e possuem uma ampla gama de aplicações dentro e fora do nicho da engenharia. De acordo com Sousa (2006) e Fernandes (2013) os problemas inversos têm aplicações significativas em diversas áreas, destacando-se especialmente na engenharia e na medicina, onde podem ser empregados de várias maneiras.

A característica fundamental desse tipo de abordagem é a resolução indireta de problemas físicos, como, por exemplo, determinar os campos térmicos em superfícies inacessíveis, deduzir a força aplicada em estruturas complexas a partir do conhecimento da

resposta e da função de transferência do sistema. Em todos esses casos, as condições de contorno dos problemas não são conhecidas ou são de difícil acesso, sendo possível resolver o problema com base em informações provenientes de sensores localizados em pontos acessíveis.

Dessa forma, a utilização de temperaturas experimentais possibilita a resolução do problema térmico, incluindo a obtenção das propriedades térmicas, do fluxo de calor superficial, da fonte de calor interna, ou ainda, da temperatura superficial em uma face sem acesso direto, entre outros aspectos.

Em sistemas dinâmicos, há três variáveis a serem analisadas: a excitação, a função de transferência e a resposta do sistema. Portanto, a resolução dos problemas ocorre ao se conhecer duas variáveis e estimar a terceira. A classe de problemas inversos é particularmente relevante nesse contexto, pois a partir do conhecimento do sistema e de sua resposta (efeito), busca-se estimar a excitação (causa). Essa abordagem pode ser aplicada de maneira análoga aos problemas de condução de calor, permitindo uma análise mais profunda desses sistemas.

Sousa (2006) e Fernandes (2013) ainda complementam acerca da natureza matemática dos problemas inversos, que são classificados como problemas mal postos, na qual a existência de uma solução para um problema inverso em condução de calor é garantida pela física: se há um efeito, então há uma causa. Entre as características desses problemas, destaca-se a possibilidade de existir mais de uma solução para o mesmo problema, o que requer o uso de ferramentas matemáticas fundamentadas na unicidade da solução estimada. Nesse contexto, destaca-se o compromisso com a modelagem, onde a unicidade da solução para problemas inversos pode ser matematicamente comprovada apenas para casos especiais. Já problemas ditos bem-postos, atendem a três requisitos fundamentais: existência, unicidade e estabilidade.

Os temas de condução de calor podem ser identificados como uma categoria especial dentro das soluções de problemas inversos. Esses problemas têm como características fundamentais a utilização de temperaturas experimentalmente medidas, a modelagem do problema térmico com base na equação de difusão de calor e o objetivo de estimar parâmetros térmicos, como a obtenção de propriedades térmicas, do fluxo de calor superficial, da fonte de calor interna, ou ainda da temperatura superficial em uma face sem acesso direto.

Ao analisar essas características, percebe-se que o problema de usinagem se encaixa bem nessa classe de problemas, uma vez que a usinagem por torneamento é um dos objetos deste trabalho. Em outras palavras, o desejo é compreender a distribuição de temperatura na face de corte, cuja medição direta é complicada. No entanto, é possível utilizar informações de temperaturas medidas em regiões de fácil acessibilidade para estimar o fluxo de calor na

face de corte e, a partir disso, calcular a temperatura no ponto desejado (Lima, 2001).

De uma maneira geral, esse método pode apresentar erros quanto à coleta de dados em testes devido a quantidade de parâmetros, aumentando a complexidade da metodologia, que passa ainda pelo modelo térmico uni, bi ou tridimensional e o método inverso em si (Santos Junior, 2022).

Além disso, os problemas inversos são altamente sensíveis aos efeitos degenerativos do ruído aditivo nos dados de entrada, no operador ou mesmo nas limitações impostas pela natureza iterativa do processo computacional. Portanto, é necessário empregar técnicas especiais para garantir que a solução atenda aos critérios de estabilidade (Sousa, 2006).

Na literatura encontramos uma diversidade de soluções analíticas e numéricas para problemas inversos de condução de calor. Técnicas de otimização e filtros, que se baseiam na teoria de sistemas e controle, têm sido amplamente empregadas como alternativas na resolução desse tipo de problema. Uma técnica inversa eficaz deve ser capaz de lidar com problemas do mundo real, que frequentemente envolvem geometrias complexas, contornos desconhecidos e/ou de difícil acesso (Fernandes, 2013). Existem várias técnicas para solucionar problemas inversos, cada qual com suas vantagens e desvantagens que serão aqui citadas e exploradas.

2.1.1. Técnicas para solução de problemas inversos

A partir das primeiras contribuições de Stoltz (1960), uma grande quantidade de pesquisadores buscou compreender, expandir as descobertas e aplicar as técnicas de problemas inversos, especialmente em condução de calor, e neste capítulo será apresentada uma breve revisão de algumas dessas técnicas.

O método da função especificada sequencial, baseada no teorema de Duhamel, e nos métodos de mínimos quadrados, foi desenvolvida por Beck, Blackwell e Clair (1985) e consiste em minimizar sucessivamente o erro estimado para o tempo atual e passos futuros, consistindo na técnica mais utilizada em problemas inversos. O método proposto pela abordagem sequencial envolve adotar uma forma funcional para a variação do fluxo de calor ao longo do tempo. Essa função pode ser modelada como uma sequência de segmentos constantes, segmentos lineares, ou pode assumir formas como parábolas, cúbicas ou exponenciais.

Outras variações possíveis nesse método incluem a estimativa simultânea de todos os parâmetros para o intervalo total ou a estimativa sequencial dos parâmetros. A partir dessa função especificada, Keanini, Ling e Cherukuri (2005), propuseram uma estabilização para

essa solução. A ideia era minimizar os erros de medição experimentais a partir de passos computacionais de tempo maiores que os intervalos de amostragem, obtendo assim uma anulação mais rápida do erro, estabilidade, precisão e capacidade de solucionar problemas não lineares.

Os pesquisadores Özişik e Orlande (2000) apresentam o método do gradiente conjugado com equação adjunta, que é baseada na regularização iterativa dos resultados, podendo ser utilizada para estimativa de parâmetros como as condições de contorno e a condutividade, e em problemas lineares e não lineares, além de ser uma das técnicas mais utilizadas nesse meio. Colaço, Orlande e Dulikravich (2006), apresentam a técnica do gradiente conjugado em conjunto com a equação adjunta, além de outras abordagens inversas e de otimização, explorando as semelhanças e diferenças entre esses dois tipos de métodos e suas aplicações em problemas de transferência de calor.

Sob essa técnica, Lima (2001) estimam a taxa de transferência de calor na interface cavaco-ferramenta em um problema de usinagem, enquanto Loulou e Scott (2003) propõe um algoritmo para resolver problemas inversos tridimensionais instáveis e não lineares. Nesse caso, é utilizado um método combinado de regularização iterativa e gradiente conjugado. A técnica apresenta resultados satisfatórios em simulações, tanto com quanto sem a adição de ruídos nas medidas de temperatura.

Existem diversas ferramentas numéricas de otimização disponíveis para a resolução de problemas inversos. A seção áurea destaca-se como uma das técnicas mais populares para estimar máximos, mínimos ou zeros de funções que possuem apenas uma variável (Vanderplaats, 1984).

Algumas características específicas tornam essa abordagem particularmente interessante em processos de otimização, ela não requer derivadas contínuas, ao contrário de abordagens baseadas em aproximação polinomial, possui uma taxa de convergência conhecida e é de fácil implementação. Os autores Carvalho e Guimarães (2006) apresentam uma metodologia desenvolvida para a solução de problemas inversos a ser aplicada em fornos de recozimento a partir do uso do método da seção áurea.

Uma considerável parcela das técnicas de problemas inversos é destinada a problemas unidimensionais. No entanto, a aplicação direta dessas técnicas, em sua maioria desenvolvidas para problemas unidimensionais, em contextos multidimensionais não é trivial. Os autores Blum e Marquardt (1997) propuseram em seu trabalho uma técnica que teve aplicação inicial em problemas unidimensionais e demonstrou grande potencial para extensão a problemas multidimensionais foi o método fundamentado em observadores dinâmicos.

A técnica proposta inclui parâmetros ajustáveis que variam de acordo com o nível de ruído presente nos dados experimentais. O algoritmo, fundamentado em observadores

dinâmicos, aborda o problema inverso de condução de calor como um filtro para as componentes do sinal do fluxo verdadeiro. Ao mesmo tempo, ele suprime as componentes de alta frequência, agindo como um filtro passa-baixo, evitando uma amplificação excessiva do efeito do ruído durante a estimativa.

Porém, apesar desse potencial, esse método é inviável a problemas multidimensionais, pois geram um alto custo computacional e um tempo de processamento muito grande. De forma a aprimorar essa técnica, Sousa (2006) desenvolveu uma nova técnica de observadores dinâmicos com aplicação direta em problemas multidimensionais. A proposta é fundamentada na obtenção da função de transferência por meio do uso de funções de Green e na definição de sistemas dinâmicos equivalentes, possibilitando uma aplicação direta em problemas multidimensionais.

Esse procedimento permite abordar de maneira indiferente um problema térmico unidimensional, bidimensional ou tridimensional, contanto que as condições de contorno inativas sejam homogêneas e o fluxo de calor desconhecido seja aplicado em uma região específica.

Sousa, Carvalho e Guimarães (2008) apresentaram um procedimento para a utilização de observadores dinâmicos na resolução de problemas inversos multidimensionais em condução de calor. O novo método envolve o emprego de funções de Green e a definição de sistemas dinâmicos equivalentes para obter a função de transferência de maneira simples e direta. Esse procedimento pode ser aplicado de forma indistinta em modelos unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais. Para avaliar a eficácia da técnica de observadores baseada em funções de Green, foram conduzidos estudos simulados e experimentais em modelos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais.

Além disso, a técnica proposta foi comparada com métodos estabelecidos na solução de problemas inversos, como o método da função sequencial especificada, e técnicas de otimização, como o método da seção áurea. A técnica desenvolvida demonstrou ser eficiente, robusta, com baixo custo operacional, de fácil implementação e competitiva na obtenção de resultados.

Em seu trabalho, Fernandes (2013), propôs uma solução para o problema inverso através da identificação da função de transferência analítica por meio de funções de Green, representando uma abordagem simples e inovadora tanto no desenvolvimento teórico quanto na implementação computacional. A metodologia adotada envolve o estudo da solução do problema direto utilizando funções de Green, resultando na determinação da função de transferência para o problema de condução de calor, considerando o fluxo de calor como uma distribuição delta de Dirac.

Com a obtenção da função de transferência, torna-se possível estabelecer um método para a estimativa do fluxo de calor por diferentes abordagens, seja através de deconvolução, da transformada rápida de Fourier inversa, ou por cálculos de densidades espectrais, todas sendo equivalentes entre si.

A Inferência Bayesiana é um método estocástico que modela os valores derivados de observações Y por meio de uma distribuição de probabilidade, representada por uma densidade ou função de probabilidade $f(Y, \beta)$. Aqui, β denota uma característica de interesse que descreve a distribuição da variável, sendo o fator Y tratado como efeito e o β como a causa do acontecimento. A obtenção do desvio padrão nesses modelos permite uma determinação precisa e direta das incertezas nos estimadores (Gnanasekaran; Balaji, 2011). A inferência bayesiana pode ser mais custosa computacionalmente em comparação com os métodos determinísticos, no entanto, apresenta a vantagem de não ficar restrita a mínimos/máximos locais, uma limitação comum nos algoritmos de minimização determinísticos fundamentados no cálculo tradicional (Jakkareddy; Balaji., 2018).

Diversas pesquisas foram bem-sucedidas ao utilizar esse método para estimar propriedades termofísicas, pode-se citar Toivanen, et. al (2012), que utilizando a estrutura de inversão estatística bayesiana, estimaram simultaneamente a condutividade térmica, a capacidade de calor volumétrica e o coeficiente de transferência de calor de uma superfície, sem ter conhecimento das condições de contorno que descrevem o fluxo de calor nela. A análise incluiu a viabilidade de uma abordagem computacional baseada em imagens termográficas térmicas, onde as temperaturas foram medidas em vários locais de maneira não invasiva.

Os resultados indicaram que o método proposto produziu estimativas semelhantes para a condutividade térmica e a capacidade volumétrica de calor, quando comparadas àquelas obtidas quando o coeficiente de transferência de calor na superfície é exatamente conhecido.

Mais recentemente, Santos Junior (2022), desenvolveu uma técnica para estimar simultaneamente a difusividade térmica e a condutividade térmica de uma liga de aço carbono (AISI 1045) texturizada e do carboneto de tungstênio (WC-Co) revestida utilizando a Inferência Bayesiana. A técnica fundamenta-se na minimização de duas funções distintas, ambas definidas pelas medidas de temperatura da superfície, empregando diferentes conceitos térmicos.

A primeira função utiliza a razão de ganho entre as duas temperaturas de superfície para identificar a difusividade térmica. Já a segunda função, determinada pelo erro quadrático entre os valores experimentais e teóricos da mesma temperatura de superfície, é empregada para estimar a condutividade térmica. O método sugerido aborda e minimiza os desafios

relacionados à unicidade frequentemente encontrados em vários procedimentos de estimativa de parâmetros.

Além das técnicas supracitadas, pode-se citar também a simulated annealing, algoritmo genérico e o método de Monte Carlo. Todos esses métodos e técnicas desenvolvidas representam processos diferentes entre si com resultados satisfatórios, porém também com pontos negativos, de acordo com suas especificidades. Dentre as principais dificuldades de aplicação dessas metodologias, de uma maneira geral, está o alto custo computacional, o grande tempo para a obtenção de resultados simulados e a influência dos ruídos na entrada dos dados experimentais, decorrentes do processo analisado, do ambiente ou do operador.

De acordo com Beck, Blackwell e Clair (1985), problemas inversos frequentemente estão suscetíveis e são sensíveis a erros aleatórios associados a experimentos. À medida que o número de parâmetros a serem recuperados aumenta, a dificuldade em estimá-los simultaneamente também cresce. Uma metodologia inversa típica envolve dados de medição, o modelo direto e o modelo inverso. Por sua natureza mal-posta, qualquer erro, independentemente de sua gravidade, gera um efeito nos resultados.

Para evitar ou diminuir problemas relacionados a otimização e estimação de parâmetros, existem outros vários tipos de métodos capazes de alcançar esse resultado. A ideia consiste em fornecer informações adicionais sobre o comportamento da solução do problema inverso, visando, desse modo, restringir o conjunto de soluções. Isso tem como objetivo alcançar soluções mais precisas e estáveis.

2.2. Ferramentas de Corte de Metal Duro e os Revestimentos

A avaliação da influência do revestimento e de sua ausência sobre um processo de usinagem ortogonal de uma peça é o foco principal desse trabalho, torna-se importante contextualizar acerca do material da ferramenta de corte utilizada nos estudos, o metal duro.

A escolha dos materiais para as ferramentas de corte depende de inúmeros fatores e parâmetros dentro do processo de usinagem, dentre eles a dureza do inserto, que precisa ser maior do que a peça, e a tenacidade, para suportar choques e impactos. Apesar de serem propriedades opostas, o aumento de uma dessas gera a redução da outra, e hoje, com a evolução dos processos de fabricação, é possível encontrar no mercado ferramentas com simultâneos predados.

A resistência mecânica também é um dos requisitos para a escolha, e este é afetado diretamente pelo aumento da temperatura, como mostra a Figura 2, que tem o efeito reduzido, assim como a dureza e a tenacidade Machado e Silva (2004).

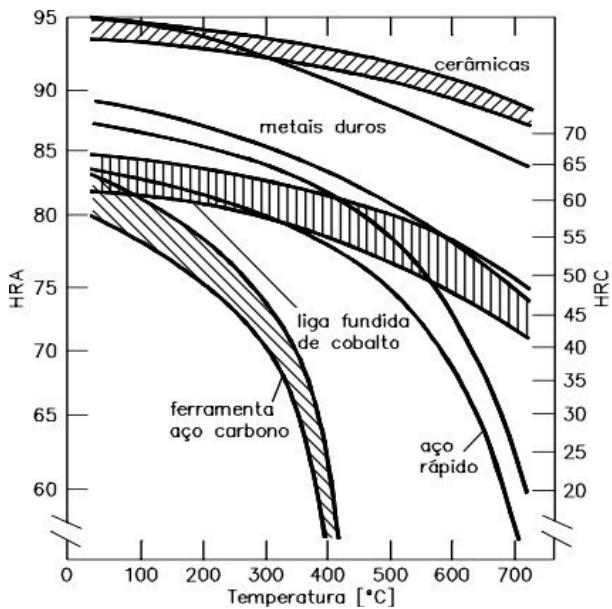


Figura 2 - A ação da temperatura na dureza de materiais de ferramenta de corte.

Fonte: Adaptado de Machado e Silva (2004).

O metal-duro é um material de ferramenta de corte que foi desenvolvido inicialmente na década de 1920, utilizando a técnica da metalurgia do pó. Sua composição básica consiste no carboneto de tungstênio e cobalto. A fabricação desse material envolve a utilização de matérias-primas na forma de pó, onde diversos pós-metálicos são misturados, prensados e sinterizados. Esse processo resulta em um material de alta densidade composto por partículas duras incrustadas no metal ligante.

As partículas duras, representadas pelos carbonetos metálicos, conferem resistência ao desgaste, enquanto o metal ligante proporciona tenacidade ao material, de acordo com Zeilmann (1997). Os autores Machado e Silva (2004) corroboram e complementam indicando que a alta popularidade dos metais duros é atribuída à sua notável combinação de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade em níveis elevados.

De maneira resumida, o processo de fabricação das pastilhas de metal duro segue o esquema da Figura 2.1, na qual a matéria prima, os minérios scheelita e wolframita, passam por processos químicos e mecânicos para a obtenção do tungstênio (puro) que será misturado com carbono, ambos em pó, em altas temperaturas formando o carboneto de tungstênio (WC). Após esta etapa, adiciona-se ainda o cobalto, também em pó, para serem compactados, receberem pré-dimensões e finalizarem o processo na sinterização. A microestrutura do metal duro pode ser identificada na Figura 2.2.

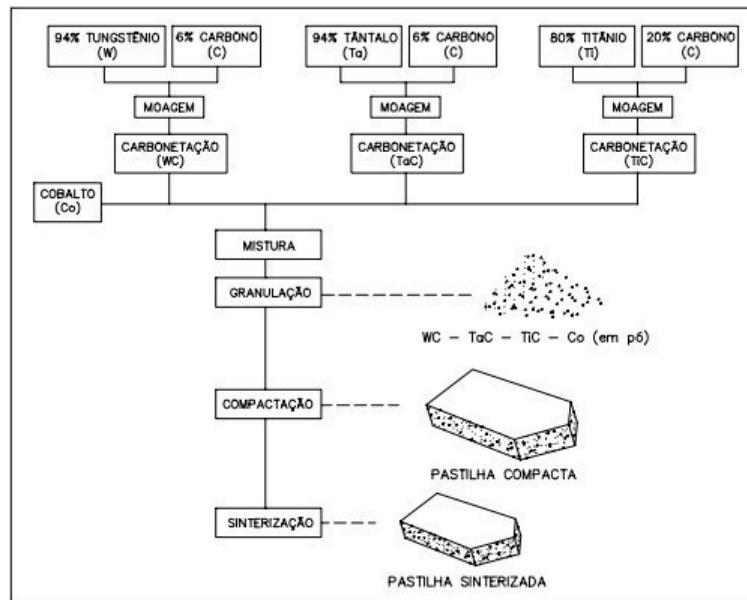


Figura 2.1- Esquema do processo de fabricação de pastilhas de metal duro. Fonte: Machado e Silva (2004e).

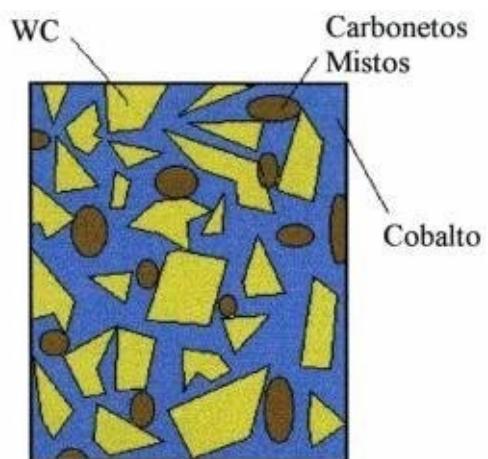


Figura 2.2 - Microestrutura do metal duro. Fonte: Konig (1990).

Os metais-duros são categorizados em grupos P, M, K, N, S e H com os critérios de classificação baseados em sua composição e nas propriedades resultantes, como mostra a Figura 2.3 para os grupos P, M e K. O grupo P é caracterizado por uma alta resistência a altas temperaturas e uma menor resistência ao desgaste abrasivo.

O grupo M apresenta uma média resistência a altas temperaturas e boa resistência à abrasão. Já o grupo K possui menor resistência a altas temperaturas, mas uma alta resistência ao desgaste abrasivo (Konig, 1990, apud Zeilmann, 1997).

Classe ISO	Aplicações na usinagem de:		
P10 P15 P20 P25 P30 P40	Aços comuns, aços ligados, aço fundido, aço inoxidável, ferro fundido maleável de cavacos longos		Maior dureza e resistência ao desgaste
M10 M15 M20 M40	Aços, aço fundido, aço manganês, aço inoxidável austenítico, ferro fundido maleável		Maior velocidade, maior tenacidade e maior avanço
K10 K20 K30	Ferro fundido cinzento coquilhado maleável, aços temperados, metais não ferrosos, plástico e madeira		

Figura 2.3 - Classe e aplicação dos metais duros. Fonte: Konig (1990).

2.2.1 O revestimento de ferramentas de metal duro

O conceito por trás do revestimento é assegurar que uma ferramenta possua características tenazes no núcleo e, simultaneamente, seja dura, resistente ao desgaste e quimicamente inerte na superfície. O revestimento de ferramentas de metal duro tornou-se crucial, proporcionando um desempenho significativamente superior em comparação com ferramentas não revestidas durante a usinagem de materiais ferrosos.

Um fator crucial para o crescimento da aplicação de ferramentas de metal duro revestidas foi o aprimoramento das técnicas de revestimento e, como resultado, uma maior acessibilidade financeira desses produtos. Em contraste com as ferramentas de aço-rápido revestidas, que utilizam exclusivamente o processo PVD (Deposição Física de Vapor), os metais duros podem ser submetidos tanto ao processo PVD quanto ao CVD (Deposição Química de Vapor).

Além da decisão sobre o tipo de processo para a deposição do revestimento, outra variável importante na escolha é o número de camadas revestidas presentes nas ferramentas que pode variar entre 4 a 12 µm, de acordo com Machado e Silva (2004f). Sobre a base do metal-duro, aplica-se uma ou várias camadas finas, como mostra a Figura 2.4, duras,

resistentes à abrasão compostas por materiais como carbonetos (por exemplo, TiC, HfC, ZrC), nitretos (por exemplo, TiN, HfN, ZrN), carbonitretos (TiCN) ou óxidos (por exemplo, Al₂O₃) (Zeilmann, 1997b).

O TiC é frequentemente empregado como a primeira camada de revestimento devido à sua excelente coesão com o substrato. O Al₂O₃ apresenta diversas vantagens, incluindo inércia química, alta dureza, proporcionando resistência ao desgaste, e uma característica interessante: a redução de sua condutividade térmica com o aumento da temperatura.

Essa redução contribui para criar uma barreira térmica eficaz na superfície da ferramenta. Vale destacar que, no revestimento, ao contrário do substrato, uma menor condutividade térmica é benéfica, pois limita a quantidade de calor que alcança o substrato. Para o substrato, por outro lado, uma maior condutividade térmica é desejável, pois facilita a rápida dissipação do calor recebido (Machado e Silva, 2004).

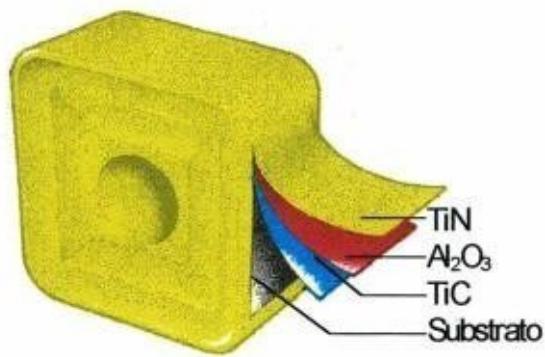


Figura 2.4. Exemplo de uma pastilha de metal duro com três camadas de revestimento. Fonte: Marcondes (1990).

No presente trabalho o revestimento utilizado será o TiN, nitreto de titânio. Ele geralmente serve como a camada externa de revestimento devido à sua capacidade de proporcionar baixos coeficientes de atrito entre a ferramenta e o cavaco. O TiN é quimicamente mais estável do que o TiC, apresentando uma menor propensão a fenômenos de difusão quando em contato com aços. A espessura típica da camada de TiN costuma ser de 5 a 7 µm, conferindo à pastilha uma coloração dourada Stemmer (1989).

Os revestimentos são desenvolvidos tanto para aplicações em altas temperaturas, como o caso de brocas e fresas utilizadas em processos de usinagem de metais a seco (Blau, 2010), quanto para temperaturas elevadas de operação, dependentes da velocidade de corte (Gomes, 2012). Devido essa variação os revestimentos precisam apresentar uma composição química que resulte em uma boa estabilização térmica, superfície dura e resistente ao

desgaste (Voevodin, Muratore, Auoadi, 2014).

Entretanto, o aumento da temperatura geralmente resulta em uma diminuição da dureza dos materiais, o que, por sua vez, contribui para o aumento do coeficiente de atrito entre a ferramenta e a peça a ser usinada. Esse aumento do atrito, juntamente com a taxa de desgaste do inserto, leva a uma redução na vida útil da ferramenta (Serra, 2019).

O revestimento de ferramentas de corte oferece proteção e uma sobrevida a este elemento. Por isso, faz-se necessário gerar estudos e pesquisas sobre como os revestimentos funcionam para compreender e aplicar as melhorias de desempenho nas ferramentas de corte na usinagem em detrimento das ferramentas sem revestimento.

De forma a expandir e nortear este trabalho, a seguir será levantado uma série de pesquisas realizadas relacionando o uso de diferentes tipos de revestimentos em variadas ferramentas de corte avaliando diferentes propriedades térmicas, bem como os seus resultados e a influência que a temperatura tem nos efeitos tribológicos de uma ferramenta de corte.

Os autores Miranzo, et. al (2002) estimaram a difusividade e condutividade térmica em dois tipos de ferramentas (substratos), uma de metal duro a base de cobalto e a outra com compósitos de Si₃N₄-SiC, ambos substratos com revestimento de diamante, mas com as espessuras diferentes. Os resultados apontaram um aumento da condutividade para os dois casos, mas com um aumento considerável para a ferramenta de metal duro.

Dorr, et al. (2003) conduziram uma análise do processo de furação de uma peça de aço utilizando ferramentas de metal duro revestidas com diferentes materiais, incluindo TiAlN (nitreto de titânio e alumínio), TiAlBON (oxinitreto de titânio, alumínio e boro), TiAl+ZrO₂ (alumineto de titânio + dióxido de zircônio) e TiAlBN (nitreto de titânio, alumínio e boro). Para isso, os autores empregaram uma técnica que se baseia na radiação infravermelha emitida pela interface entre o cavaco e a ferramenta, a fim de determinar a temperatura absoluta e a distribuição da temperatura na zona de contato entre o cavaco e a ferramenta.

Os resultados mostraram que o valor da temperatura máxima na aresta de corte, para todas as ferramentas revestidas, foi inferior em comparação com a ferramenta não revestida, devido à diminuição do atrito que resulta em uma redução do calor friccional. Essa redução na temperatura contribui para um aumento na vida útil da ferramenta.

Em um estudo realizado por Grzesik e Nieslony (2004), foram empregados dois modelos térmicos teóricos para analisar o comportamento de revestimentos de TiN e Al₂O₃. Ambos os modelos, um bidimensional e outro unidimensional, operavam em regime permanente e foram desenvolvidos utilizando elementos finitos. Dados da literatura foram utilizados para as propriedades termofísicas.

Os resultados mostraram que os revestimentos apresentaram um efeito de barreira térmica, resultando em diferenças de temperatura de 8 K entre as pastilhas revestidas e as não revestidas. No entanto, a técnica desenvolvida mostrou-se inadequada para revestimentos finos devido ao considerável custo computacional associado.

No estudo de Rech, Battaglia e Moisan (2005), foi investigado o comportamento térmico de revestimentos por meio de um modelo térmico transiente unidimensional. Os revestimentos analisados foram compostos por carboneto de titânio (TiC), carboneto de titânio e nitreto de titânio (TiC / TiN) e carboneto de titânio, óxido de alumínio e nitreto de titânio (TiC / Al₂O₃ / TiN), aplicados em uma ferramenta de carboneto cimentado (substrato). A análise concentrou-se na influência da difusividade térmica do revestimento, cujos valores foram obtidos a partir de dados da literatura, e na espessura do revestimento.

Os autores indicaram que o fenômeno tribológico na interface entre a ferramenta e o cavaco foi a principal razão para explicar as diferenças no fluxo de calor transferido para o substrato, e que o revestimento não se torna uma barreira térmica em operações de corte contínuas, mas apenas em condições de corte interrompido, especialmente em altas velocidades de corte.

Já DU et. al (2010) avaliou a condutividade para diferentes graus de textura em exemplares de monazita LaPO₄. Essas amostras foram fabricadas através da metalurgia do pó e apresentaram uma redução da propriedade térmica a partir da variação da orientação dos planos da prensa que realiza a sinterização do material.

Martan e Benes (2012) conduziram um estudo experimental para determinar a condutividade térmica e o calor específico de diferentes revestimentos na faixa de temperatura de 20 a 500 °C. Os revestimentos investigados incluíram TiN, TiAlCN, TiAlN, AlTiN, TiAlSiN e CrAlSiN. As propriedades térmicas foram medidas utilizando o método da radiação pulsada fototérmica. Os resultados indicaram que, de maneira geral, os valores da condutividade térmica e do calor específico dos revestimentos aumentam com o aumento da temperatura.

O revestimento de CrAlSiN apresentou o menor valor de condutividade térmica e a menor taxa de crescimento em relação à temperatura. Os autores concluíram que o revestimento de Al₂O₃ resultou em uma redução do fluxo de calor na ferramenta, enquanto o TiN e os revestimentos TiAlN não tiveram impacto significativo no desempenho térmico da ferramenta. Isso se deve ao fato de que o TiN e o TiAlN possuem uma condutividade térmica relativamente alta e, portanto, não atuam como barreira térmica.

No estudo conduzido por Lian et al. (2013), foi investigado o efeito de revestimentos macios, como MoS₂ (dissulfeto de molibdênio), CaF₂ (fluoreto de cálcio) e WS₂ (sulfureto de tungstênio), em superfícies texturizadas. A ferramenta com revestimento WS₂ e texturizada demonstrou as temperaturas mais baixas na interface entre o cavaco e a ferramenta, em

comparação com a ferramenta texturizada sem revestimento e sem texturização. Essa combinação resultou em uma redução na temperatura entre 10% e 20% durante o processo de usinagem do aço. Vale ressaltar que o estudo não avaliou o impacto das propriedades termofísicas no comportamento observado.

Para obter altos valores de condutividade, Zhu et al (2014) desenvolveram uma técnica com Nitreto de Silício através do produto da difusividade térmica, da massa e do calor específico. Em comparação, as amostras texturizadas apresentaram condutividade com cerca 170 W/mK, com 100 W/mK daquelas não texturizadas.

No estudo conduzido por Samani et al. (2015), foram depositados sobre um substrato de aço inoxidável AISI 304, utilizando uma técnica de arco catódico rotativo lateral em uma atmosfera com fluxo de nitrogênio, uma série de revestimentos multicamadas compostas por TiN (nitreto de titânio) e TiAlN (nitreto de titânio e alumínio), com diferentes números de camadas. A análise da composição e microestrutura dos revestimentos foi realizada por meio de espectroscopia de energia dispersiva de raios-X, difração de raios-X (XRD) e microscopia eletrônica de transmissão convencional e de alta resolução (HRTEM). Os resultados revelaram que, à medida que o número de camadas aumentava, a condutividade térmica dos revestimentos multicamadas diminuía gradualmente.

Adamczyk, et al (2017) aplicaram uma técnica não destrutiva para mensurar a condutividade térmica efetiva de um revestimento de barreira térmica, que resolve numericamente o problema de condução da amostra. O experimento aquece um local da amostra com um laser e no registro das flutuações temporais e espaciais do campo de temperatura gerado na superfície aquecida com uma câmera infravermelha.

A condutividade térmica é reconstruída por uma técnica de problemas inversos. Os resultados foram comparados com mensurações feitas com equipamento comercial de laser pulsado em amostras cilíndricas de 1,5, 2 e 3 mm para avaliar os valores de difusão térmica. O que auferiu bons resultados.

Oliveira, et al. (2017) conduziram uma análise do efeito térmico de revestimentos em ferramentas de corte, sem considerar o efeito tribológico, e investigaram o comportamento térmico utilizando três tipos de revestimento: cobalto (Co), nitreto de titânio (TiN) e óxido de alumínio (Al_2O_3) em uma pastilha de metal duro ISO K10 com 3 mm de espessura. Foram examinados revestimentos com espessuras de 1, 2, 5, 10 e 20 μm , utilizando um modelo térmico transiente unidimensional proposto para um material composto por duas camadas. A análise adotou um fluxo de calor constante, e a solução da equação de difusão foi obtida utilizando funções de Green. O efeito dos revestimentos foi analisado pela variação da temperatura na interface de corte em contato com o fluxo de calor, assim como pela evolução da temperatura na interface substrato-revestimento. Os resultados indicaram que os

revestimentos apresentam um efeito de barreira térmica, embora para revestimentos com 2 μm de espessura essa influência tenha sido mínima.

Nos estudos de Trojanová, et al (2018) em métodos de fabricação de chapas, usando colagem acumulativa de rolos (ARB) e o efeito desse processo na condutividade térmica em ligas de magnésio AZ31, os autores descobriram que esse parâmetro afetado pela variação de temperatura, 20 a 350°C, e pela espessura da textura desenvolvida durante o processo.

Vornberger et al (2020) chegaram à conclusão de que a condutividade térmica é afetada pela quantidade de cobalto (Co) da ferramenta de metal duro, pelo tamanho do grão em sua microestrutura e pelo conteúdo de Cr₃C₂ na sua composição. Os autores calcularam a condutividade em diferentes classes de metal duro, para uma faixa de temperatura de ambiente até 1000°C, através do produto da difusividade, massa específica e do calor específico.

Já para a influência que a temperatura tem nos efeitos tribológicos, destaca-se a pesquisa elaborada por Polcar et al. (2005) que analisaram o comportamento tribológico do TiN em uma faixa de temperatura entre 25 a 500 °C e verificaram que há um aumento do coeficiente de atrito e da taxa de desgaste à medida que a temperatura ambiente aumenta.

Badisch et al. (2003) analisaram para a mesma faixa de temperatura da pesquisa anterior, o revestimento TiN com baixos teores de cloro e concluíram que a taxa de desgaste cresceu com o aumento gradativo da temperatura e foi intensificado a partir dos 200 °C devido ao aumento da abrasão. Bae (1996) analisou revestimentos de TiN com a presença de diferentes teores do lubrificante sólido MoS₂ para várias faixas de temperatura. Até a faixa dos 300°C o lubrificante mantinha baixos os valores do coeficiente de atrito. A partir desse valor o coeficiente aumentou consideravelmente resultando no aumento do desgaste do revestimento.

Em termos de pesquisas e acervo literário, a área de estudo relacionada à influência do revestimento em ferramentas de corte apresenta conclusões dúbias entre os pesquisadores e um reduzido número de obras. Não há um consenso se o revestimento atua como barreira térmica ou se são os efeitos tribológicos os grandes responsáveis pela redução da temperatura na interface da ferramenta de corte. Assim este projeto se apresenta como uma contribuição nos estudos dos campos térmicos decorrentes de um corte ortogonal analisando a parte da geração de calor no inserto e qual efeito está sendo produzido em todo o modelo.

2.3. Métodos para a Medição de Temperaturas

Durante as operações de usinagem, o atrito e o consequente cisalhamento no contato entre ferramenta de corte e a peça a ser usinada geram energia e esta é convertida em calor. De acordo com Ferraresi (1977), apenas 8 a 10% do calor total gerado durante o processo de corte flui em direção à ferramenta, no entanto, o aumento de temperatura associado a esse calor é significativo, podendo atingir a ordem de 1000 a 1100 graus Celsius, trazendo consequências sobre a peça, alterando sua acuidade dimensional, e no caso das ferramentas de corte, as temperaturas podem atingir níveis que ativam alguns mecanismos de desgaste, levando a falhas prematuras. Os principais mecanismos influenciados pela temperatura incluem a deformação plástica superficial por cisalhamento em altas temperaturas, a deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão e a difusão (Melo, 1998).

O entendimento e o controle das temperaturas geradas durante o processo de usinagem são cruciais para compreender os campos térmicos que levam ao desgaste e, por conseguinte, ao eventual colapso da ferramenta de corte. Para isso, diversos métodos, tanto práticos quanto analíticos, têm sido desenvolvidos ao longo do tempo com a finalidade de determinar a temperatura de corte gerada durante o processo de usinagem. No entanto, nenhum deles é universalmente aceito como o definitivo. Das técnicas práticas para a medição se destacam:

- os métodos calorimétricos;
- o método termopar ferramenta-peça;
- o método do termopar implantado;
- a inspeção metalográfica;
- medição utilizando vernizes termo sensíveis;
- medição com sensores infravermelhos;
- medição usando pós-químicos;
- o método do filme PVD.

2.3.1 Métodos Calorimétricos

Essa técnica é empregada para calcular a temperatura média do cavaco. Os passos a seguir incluem medir a temperatura inicial da água no calorímetro, realizar a usinagem da peça por um determinado tempo para que os cavacos caiam dentro do calorímetro, aquecendo a água. Após o término da usinagem, mede-se a temperatura final da água, como mostra a Figura 2.5.

Em seguida, pesa-se o cavaco após sua secagem e determina-se a temperatura média do mesmo utilizando a equação do calorímetro (Ferarresi 1997).

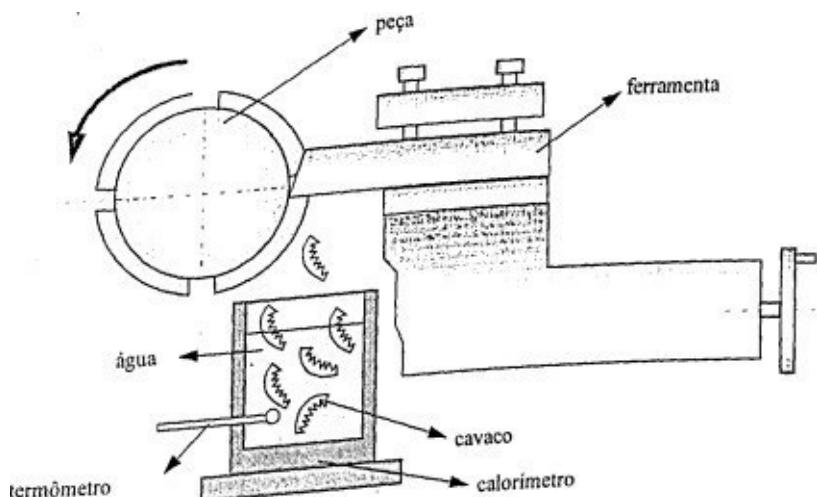


Figura 2.5 - Medição de temperatura pelo método calorímetro. Fonte: Ferarresi (1977).

Essa técnica ainda é bem difundida no meio acadêmico. O autor Silva (2015), em sua dissertação de mestrado, desenvolveu dois calorímetros para medir e analisar a variação da temperatura e esforços de corte durante um processo de furação. O calorímetro era composto de material PVC e de tecnil e contava também com termopares soldados na superfície do corpo de prova para monitoramento da temperatura.

Os resultados obtidos corroboraram com os da literatura, apontando que a porcentagem de energia convertida em calor durante o processo de usinagem, nesse caso a furação, variou de aproximadamente 88% até 93%.

Os autores Costa et al. (2018), utilizaram esse mesmo método para relacionar a energia mecânica gasta e o calor gerado no processo de furação dentro da usinagem. Os resultados indicaram que essa técnica se mostra eficiente para medir essa relação de energia

gasta e calor gerado, especialmente nos processos de furação.

Para Melo (1998), essa técnica pode ser útil para o estudo qualitativo da influência das variações nos parâmetros de usinagem sobre a temperatura de corte. No entanto, não fornece valores absolutos reais dos níveis de temperatura na região de interface cavaco-ferramenta, o que representa uma desvantagem significativa. Além disso, há a troca de calor com o meio ambiente, contribuindo para a falta de precisão do método.

2.3.2 Método Termopar Ferramenta-peça

Esse é um método de medição experimental que consiste em coletar os dados da temperatura da usinagem, sem que haja a necessidade de fazer qualquer tipo de modificação na ferramenta, diferente do que ocorre na técnica dos termopares implantados (França, 2021). Ainda, de acordo com Tabak et al (2014), o método termopar ferramenta-peça representa uma possibilidade de testes simples, possibilita a medição diretamente na interface de interação entre ferramenta e peça, através do efeito do termopar. Esse fenômeno é chamado de efeito Seebeck.

Seu funcionamento é baseado em um circuito composto por dois materiais diferentes e percorrido por uma corrente elétrica, constituindo um termopar ou um par termoelétrico, que é uma fonte de força eletromotriz (Borchardt, Gomes, 1979). Quando esses materiais são submetidos a uma diferença de temperatura, a força eletromotriz gerada é proporcional à temperatura (França, 2021). A representação desse esquema é mostrada na Fig. 2.6.

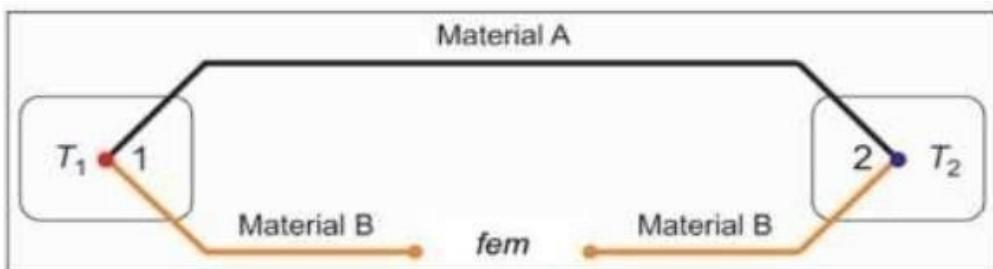


Figura 2.6 - Esquema de um circuito básico de termopar. Fonte: Lima Junior (2020).

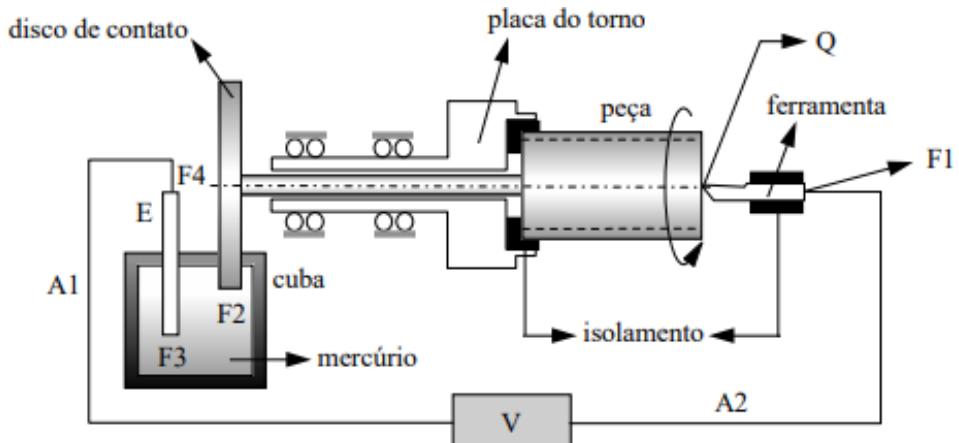


Figura 2.7 - Esquema do método termopar ferramenta-peça. Fonte: Machado e Silva (2004).

O ponto Q, onde a peça entra em contato com a ferramenta, representa a junção quente. Os pontos F1, F2, F3 e F4 representam as junções frias. A cuba é preenchida com mercúrio até que o contato elétrico do disco com o elemento E seja estabelecido, assegurando assim o fechamento do circuito. Os fios A1 e A2 conectam o sistema ao milivoltímetro V, que indica o valor da força eletromotriz (f.e.m.) gerada. O sistema pode ser calibrado para fornecer valores de temperatura em °C, como mostra a Figura 2.7 (Machado e Silva, 2004).

Kaminise et al (2014) conduziram um estudo sobre a influência do material do porta-ferramenta na temperatura da interface ferramenta-cavaco e nas temperaturas superficiais da ferramenta de corte e do porta-ferramenta durante a usinagem usando o método de termopar ferramenta em cinco porta-ferramentas confeccionados com materiais de diferentes condutividades térmicas: cobre, latão, alumínio, aço inoxidável e liga de titânio.

As principais descobertas foram que a condutividade térmica dos materiais do porta-ferramenta afeta significativamente a distribuição de temperatura na pastilha e no porta-ferramenta, mas tem menos impacto na temperatura máxima na interface ferramenta-cavaco e que a escolha do material do porta-ferramenta, especialmente considerando a condutividade térmica, é crucial para influenciar a distribuição de temperatura durante os processos de usinagem.

Os termopares representam um dos métodos experimentais mais amplamente empregados para a medição de temperatura durante a usinagem. São condutores acessíveis, capazes de operar em uma vasta faixa de temperaturas, e sua aplicação é bastante fácil. Entretanto, é importante notar que eles proporcionam uma medição apenas da temperatura média em toda a área de contato entre a ferramenta e a peça, de acordo com os autores Kus et al (2015).

2.3.3 Método Termopar Implantado

Esse método envolve a inserção de termopares de pequeno diâmetro em várias posições da ferramenta de corte, como mostra a Figura 2.8. Para isso, são feitos micro furos, geralmente por eletroerosão. Uma aplicação útil desse método é na determinação da distribuição de temperatura em insertos de metal duro.

Para realizar isso, as ferramentas devem ser furadas em diversas posições e profundidades. É crucial que haja apenas um furo por inserto para minimizar a perturbação do fluxo de calor. Caso contrário, a determinação da distribuição de temperatura se torna uma tarefa extremamente difícil (Machado e Silva, 2004).

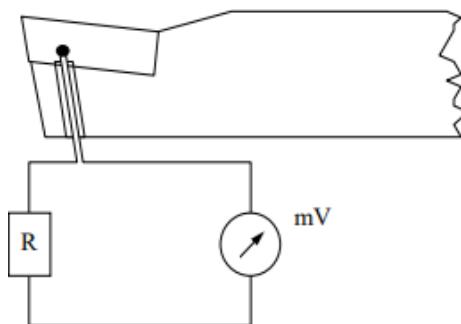


Figura 2.8 - Método do Termopar Implantado. Fonte: Melo (1998c).

Grzesik (1999) investigou a influência da temperatura na interface da ferramenta na usinagem dos materiais AISI 1045 e AISI 304 utilizando ferramentas revestidas. Um termopar tipo K padrão inserido na peça de trabalho foi usado para medir a temperatura da interface, e os resultados mostraram que o atrito na face do flanco teve grande influência no calor gerado a uma velocidade de corte de aproximadamente 200 m/min.

Kus et al (2015) utilizaram duas técnicas para a medição das temperaturas e, ao integrar os termopares implantados, para medir a temperatura da ferramenta, com o uso de sensores infravermelhos, para a medição da interface cavaco-ferramenta durante a usinagem, o estudo foi capaz de capturar informações de temperatura de vários pontos do processo de corte de metal, facilitando um exame detalhado da distribuição de temperatura, levando a uma melhor compreensão dos mecanismos de geração e transferência de calor durante as operações de usinagem.

2.3.4 Método da Inspeção Metalográfica

A distribuição da temperatura de corte pode ser determinada por meio da inspeção metalográfica da própria ferramenta. A dureza à temperatura ambiente de aço carbono endurecido e aço rápido diminui após o reaquecimento, sendo a redução na dureza dependente da temperatura e do tempo de aquecimento, (Machado e Silva, 2004).

Ferramentas de aço carbono endurecido começam a perder dureza a partir de 250 °C, e essa propriedade é rapidamente reduzida após um aquecimento a 600 °C. Por outro lado, ferramentas de aço rápido não sofrem um amolecimento apreciável até 600 °C. Entre 600 e 850 °C, a dureza diminui rapidamente, mas pode aumentar novamente para temperaturas de reaquecimento mais altas se forem rapidamente resfriadas.

Ao calibrar a dureza em relação à temperatura e ao tempo de aquecimento, é possível obter uma família de curvas (Trent, 1984). Portanto, ao medir a dureza em qualquer zona afetada pelo calor e conhecer o tempo de aquecimento, a temperatura alcançada na região pode ser determinada. A principal limitação desse método é sua aplicação restrita a aços (Melo, 1998).

A Figura 2.9 ilustra a distribuição de temperatura para avanços crescentes, obtida por meio da técnica metalográfica. Observa-se um aumento constante da temperatura e da zona afetada pelo calor conforme esse parâmetro aumenta.

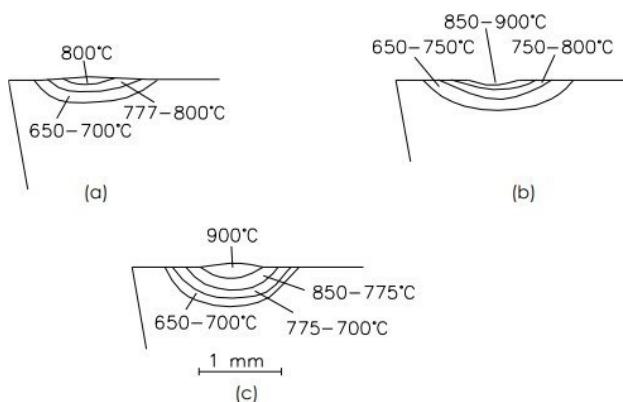


Figura 2.9 - Influência do avanço nas temperaturas de corte. a) $f = 0.125 \text{ mm/rev}$; b) $f = 0.250 \text{ mm/rev}$; c) $f = 0.500 \text{ mm/rev}$. Fonte: Trent (1984).

2.3.5 Método de Medição Utilizando Vernizes Termo Sensíveis

De acordo com Machado (2015), o método de utilização de vernizes termo sensíveis envolve a aplicação de vernizes que mudam de cor em resposta a determinadas temperaturas. Essa mudança de cor pode ocorrer devido às propriedades intrínsecas das substâncias presentes no verniz ou como resultado de reações químicas desencadeadas pelo calor.

No entanto, é importante destacar que esses vernizes não são aplicáveis diretamente nas interfaces durante o processo de usinagem, mas sim em superfícies externas e expostas. Eles fornecem uma indicação visual da temperatura atingida nessas regiões, sendo úteis para fins de monitoramento e controle térmico.

O tempo necessário de exposição à temperatura de reação também pode ser uma limitação em alguns produtos, pois, embora o tempo de início da reação seja de alguns milissegundos, na área de contato o atrito remove a tinta, impedindo uma avaliação precisa dos contornos dos isotermas.

2.3.6 Método com Sensores Infravermelhos

Este método fundamenta-se no princípio em que um componente aquecido emite uma quantidade específica de radiação térmica. Ao direcionar essa radiação para um sensor de temperatura, ela gera uma força eletromotriz que pode ser detectada por um milivoltímetro. Por meio de uma calibração adequada, é possível relacionar a f.e.m. com a temperatura equivalente e, assim, determinar a distribuição de temperatura em determinadas regiões da ferramenta de corte.

É evidente que o calor irradiado pela ponta da ferramenta está sendo focalizado, por meio de um sistema de lentes, no termo elemento (termopar). Esse termo elemento gera uma diferença de potencial proporcional à temperatura naquela região. A diferença de potencial gerada é medida por meio de um milivoltímetro. O sistema é ilustrado na Figura 2.10, e pode ser calibrado para fornecer valores de temperatura na região da ferramenta, em qualquer unidade desejada (Melo, 1998e).

Kus et al (2015) utilizaram essa técnica para realizar a medição da temperatura na interface cavaco-ferramenta durante uma operação de usinagem integrando com a técnica do termopar implantado. O estudo concluiu que a velocidade de corte teve o impacto mais significativo na temperatura da interface ferramenta-cavaco, enquanto o efeito da taxa de avanço não foi mencionado.

Tanto a velocidade de corte quanto a taxa de avanço tiveram efeitos semelhantes na

temperatura da ferramenta. À medida que a velocidade de corte aumentou, foram observadas mudanças significativas na forma e na curvatura do cavaco, indicando uma correlação direta entre os parâmetros de corte e a distribuição de temperatura.

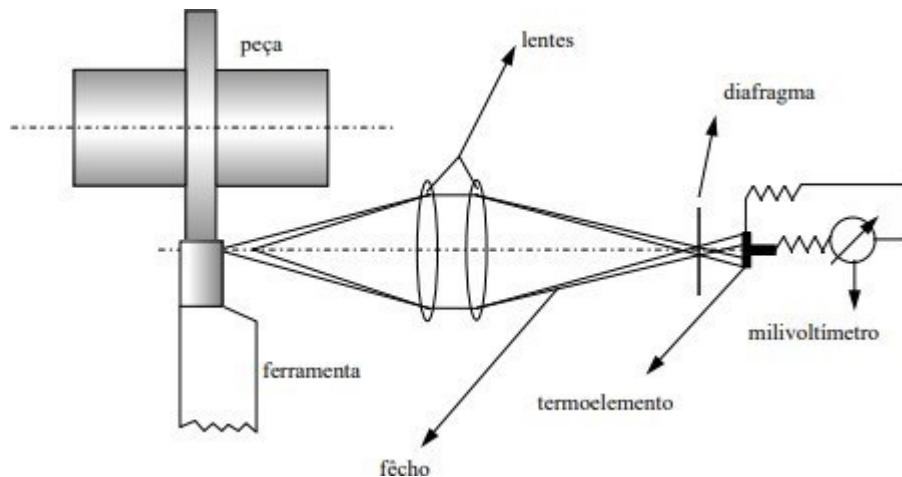


Figura 2.10 - Medição da temperatura de corte através do método da radiação infravermelha. Fonte: Ferraresi (1977).

2.3.7 Método de Medição com o Uso de Pós Químicos

Essa técnica envolve a utilização de sais com pontos de fusão bem definidos, como NaCl, KCl, CdCl₂, PbCl₂, AgCl, KNO₃, para a determinação da distribuição de temperatura no corpo da ferramenta de corte. Para este método, inicialmente é feita a fragmentação do inserto em duas seções de dimensões idênticas. Normalmente, esse procedimento é executado por meio de abrasão (retificação) dos insertos, até que a dimensão desejada seja atingida, equivalente à metade do tamanho original.

Para criar uma ferramenta bipartida usando o método mencionado, é imperativo ter pelo menos dois insertos compostos do mesmo material. Com a ferramenta dividida pronta para uso, o passo seguinte envolve a aplicação de uma solução de silicato de sódio nas superfícies retificadas. Isso é feito para aprimorar a aderência do sal, que será posteriormente distribuído sobre essas superfícies.

Após o processo de corte, a ferramenta é novamente desmembrada, e a isotérmica resultante da fusão do sal é examinada. Essa isotérmica pode ser discernida pela linha formada entre o sal que passou pelo processo de fusão e aquele que permaneceu sem alterações.

Ao repetir esse procedimento utilizando diversos tipos de sais, cada um com pontos de fusão distintos, e empregando ferramentas compostas do mesmo material, torna-se possível determinar a distribuição de temperatura no plano ortogonal à aresta da ferramenta de corte. A seguir, na Figura 2.11, está a representação deste método.

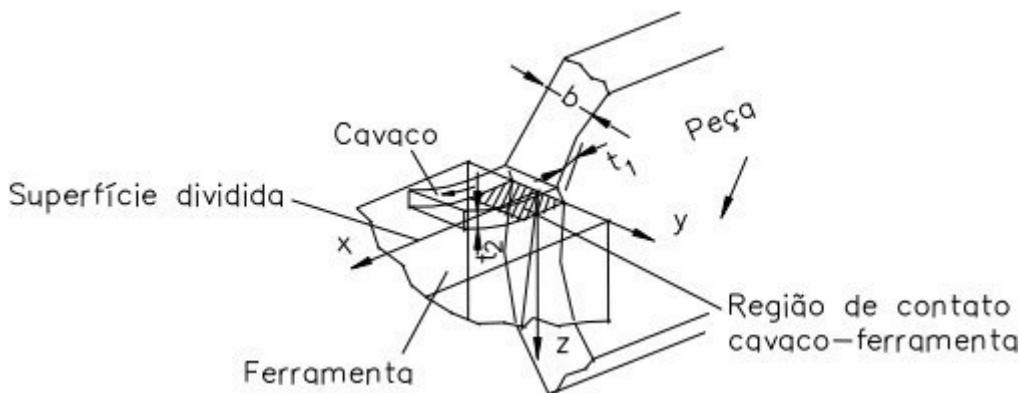


Figura 2.11 - Experimento realizado por Kato (1976) para determinação da distribuição da temperatura no inserto. Fonte: Machado e Silva (2004).

2.3.8 Método do filme PVD

Essa técnica envolve a aplicação de camadas finas de diversos materiais, cada um com pontos de fusão específicos, em uma superfície perpendicular à saída dos insertos de metal duro. Após a aplicação do filme de um material específico, as partes da ferramenta são unidas e utilizadas para usinar um disco por meio de um processo de corte ortogonal, como está representado na Fig. 2.12.

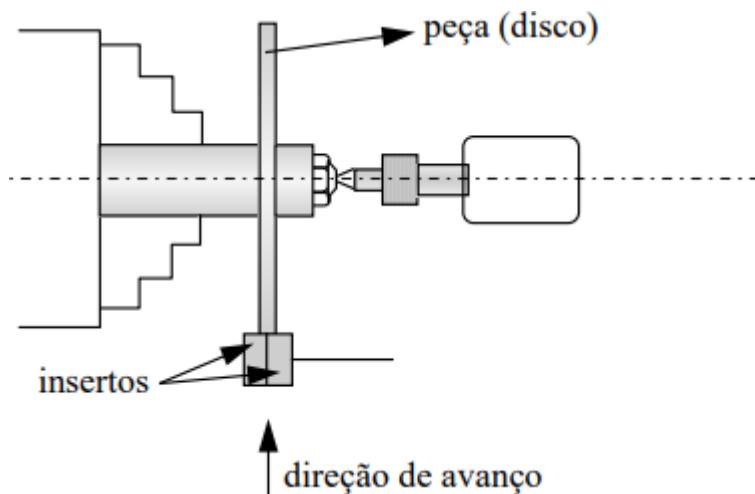


Figura 2.12 - Experimento para medição de temperatura pelo método PVD. Fonte: Machado e Silva (2004).

2.3.9 Métodos Analíticos e Numéricos para Determinação da Temperatura de Corte

Apesar de eficientes, os tipos de métodos práticos para a obtenção da temperatura de corte durante de usinagem podem apresentar limitações experimentais. Por isso, há também a possibilidade do uso de métodos analíticos e numéricos, como os elementos finitos, as diferenças finitas, os elementos de contorno, além dos problemas inversos para essas soluções.

Normalmente, pela complexidade dos conjuntos a serem analisados, especialmente na solução de problemas térmicos, utilizando técnicas inversas nos processos de usinagem, as soluções analíticas são apenas aproximações do modelo real. Por isso, inúmeros pesquisadores também utilizam métodos numéricos para resultados mais próximos da realidade e menos aproximados. A seguir estão listados alguns trabalhos que utilizam esses modos de pesquisa.

Melo (1998) propôs um método baseado em técnicas de problemas inversos para a medição em tempo real da temperatura na aresta inferior, oposta à aresta de corte, durante a usinagem. Ele notou que, para um mesmo período de usinagem, a temperatura registrada com ferramentas de cerâmica é menor do que aquela obtida com ferramentas de metal duro, como mostra a Fig. 2.13.

Essa observação inicialmente parece lógica, pois teoricamente as cerâmicas apresentam menor afinidade química com materiais ferrosos, resultando em menor restrição ao movimento de saída do cavaco (menor atrito), gerando assim menos calor e, por conseguinte, menor temperatura de corte em comparação com ferramentas de metal duro.

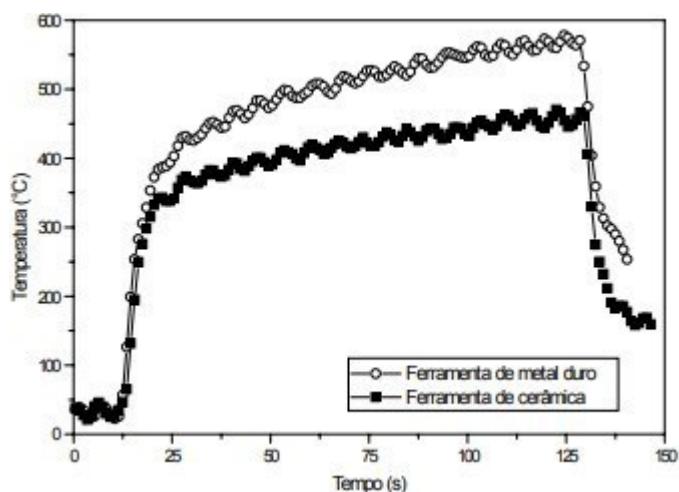


Figura 2.13 - Temperaturas estimadas em insertos de cerâmica e metal duro. Fonte: Melo (1998).

Carvalho (2005), desenvolveu em sua tese uma nova técnica de medição da temperatura de corte na interface da ferramenta, relacionando os modelos teórico e experimental, sem a necessidade de simplificações de modelos. Essa análise mais abrangente proporciona uma compreensão mais aprofundada do processo real de usinagem e contribui significativamente para a capacidade de prever o desempenho do processo de fabricação.

Para isso, o autor utilizou o método das diferenças finitas para resolver o modelo térmico de usinagem em qualquer parte do conjunto, solucionou problema inverso através da técnica de otimização da seção áurea, para determinar a taxa de transferência de calor na interface cavaco-ferramenta e desenvolveu um código computacional para determinar o fluxo e as temperaturas durante o torneamento. O método apresentado se mostrou adequado para a modelagem e determinação de parâmetros térmicos de conjuntos que contenham a ferramenta de corte, o calço e o porta-ferramentas, se mostrando mais efetivo do que modelos na literatura que consideram apenas a ferramenta durante a usinagem.

Sousa (2009) propôs uma nova metodologia para a obtenção da taxa de transferência de calor na interface de corte e do campo de temperatura na peça, ao invés da broca, a partir da solução numérica do problema térmico de furação e do uso de técnicas inversas de solução de problemas de transferência de calor, baseadas em funções de Green e observadores dinâmicos.

Liang, Xu e Ke (2013) propuseram um método inverso tridimensional para investigar a temperatura na interface entre o cavaco e a ferramenta durante a usinagem a seco do aço AISI 1045, utilizando um inserto de metal duro. Utilizando uma câmera infravermelha, os autores mediram a temperatura na superfície de saída da ferramenta, que foi posteriormente empregada para calcular o fluxo de calor através do método do gradiente conjugado. O modelo térmico foi resolvido por meio do método das diferenças finitas implícito, levando em consideração as propriedades térmicas variáveis com a temperatura e um coeficiente de convecção constante.

Rezende (2020) conduziu um estudo com o objetivo de avaliar o desempenho de insertos de metal duro, tanto sem revestimento quanto com revestimento. Além disso, buscou-se analisar qual ferramenta demonstrou um comportamento mais eficiente no processo de torneamento do ferro fundido vermicular.

Adicionalmente, durante a pesquisa, foi desenvolvido um modelo analítico simplificado para a temperatura do cavaco e para a temperatura na interface entre o cavaco e a ferramenta. Esse modelo levou em consideração a variável condutividade térmica equivalente. Além disso, um modelo numérico, baseado em elementos finitos, também foi elaborado como parte do estudo.

Pagotto (2023) avaliou a viabilidade do uso de câmeras térmicas para determinar e investigar o comportamento da temperatura durante o processo de usinagem. O estudo concentra-se no torneamento sem lubrificação do aço ABNT 1045, empregando pastilhas de metal duro revestido. O objetivo é comparar essa análise com o modelo analítico proposto por Trigger e Chao. O modelo desses autores se fundamenta no corte ortogonal, considerando um fluxo de calor uniforme gerado devido ao cisalhamento e ao atrito, embora desconsidere o atrito entre a superfície usinada e a superfície de folga da ferramenta.

É notável, principalmente, que o comportamento da temperatura em relação aos parâmetros de corte utilizados está em conformidade com o que é observado na literatura. Ao analisar os gráficos e as curvas geradas, evidencia-se a tendência de aumento da temperatura com o incremento da velocidade de corte em ambos os métodos. Além disso, observa-se uma tendência de diminuição da temperatura com o aumento do avanço, conforme indicado pelos dois métodos analisados.

CAPÍTULO III

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Problema Direto

Como já observado, o principal objetivo deste trabalho é avaliar a influência do revestimento em uma ferramenta de corte de metal duro, durante o processo de usinagem ortogonal, por torneamento, através da estimativa do fluxo de calor gerado no inserto. Para isso, a solução do problema direto, passa pela modelagem tridimensional do conjunto ferramenta e suporte da ferramenta.

O conjunto é composto pela ferramenta e seu suporte, chamado porta-ferramenta, conforme mostra a Figura 3. Para a solução do problema térmico optou-se por uma abordagem numérica, justamente pela complexidade da solução analítica devido a geometria e o contato do porta-ferramenta com a ferramenta.

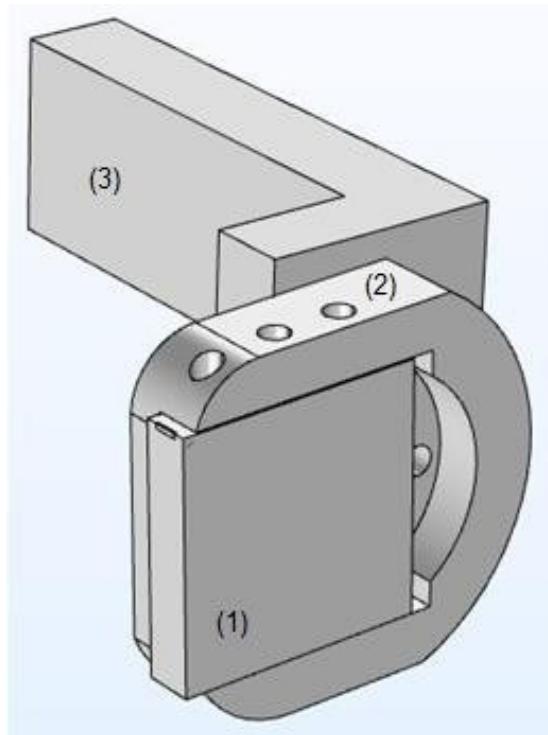


Figura 3 - Modelagem tridimensional do conjunto ferramenta (1) e suporte da ferramenta (2, 3). Fonte: Autoria própria.

A equação governante para o problema térmico em questão é a equação da difusão de calor:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1),$$

onde T representa a temperatura, t o tempo e α a difusividade térmica.

As condições de contorno aplicadas no conjunto são representadas pela exposição à um meio convectivo exceto na interface peça-ferramenta, onde parte do calor gerado flui para a ferramenta. A Figura 3.1 apresenta um modelo esquemático dessas condições. O bloco que faz o suporte do porta-ferramentas no torno CNC não foi levado em consideração para a modelagem.

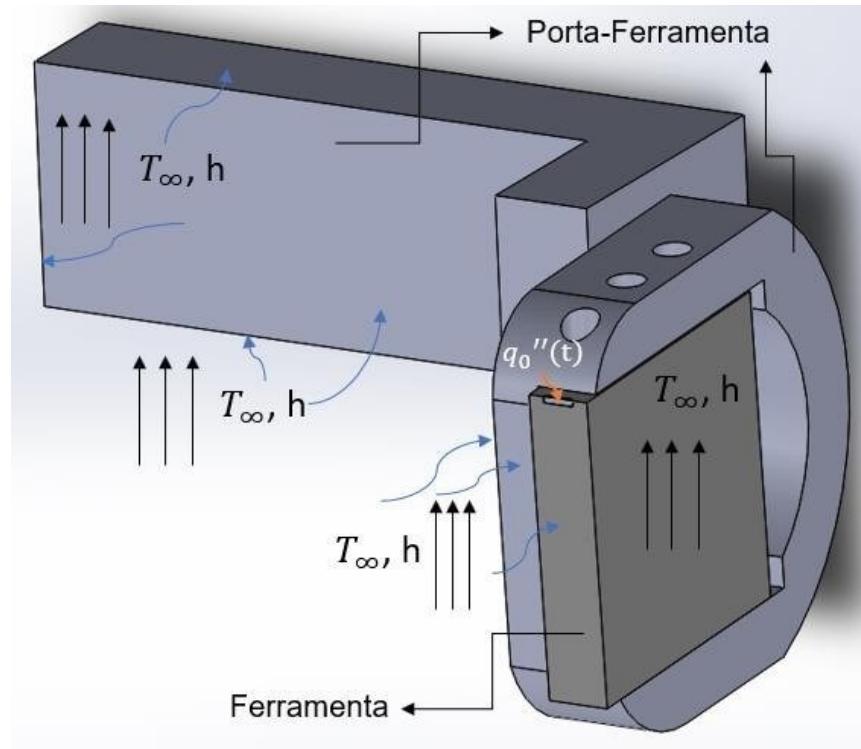


Figura 3.1 - Condições de contorno aplicadas ao conjunto da ferramenta. Fonte: Autoria própria.

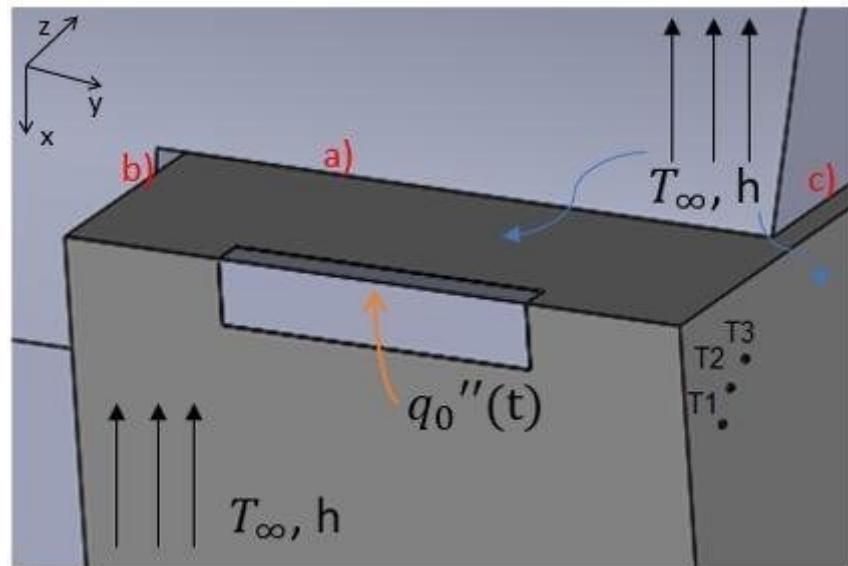


Figura 3.2 - Condições de contorno aplicadas à ferramenta. Fonte: Autoria Própria.

Observa-se na Figura 3.2, as condições de contorno aplicadas à ferramenta. Boa parte dela (em a, b e c) apresenta resistência térmica por contato com o porta-ferramentas, as demais partes estão em contato com o ambiente, com condição de contorno por convecção,

e apenas uma pequena área está em contato direto com a peça a ser usinada, sujeita pelo fluxo térmico $q_0''(t)$ e T1, T2 e T3, representam as posições dos três termopares fixados à superfície para a medição das temperaturas experimentais durante a usinagem.

Logo, a condição de contorno para a interface peça-ferramenta, pode ser descrita por:

Na interface de corte

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial \eta} = q_0''(T) \quad (3.2),$$

e as condições de contorno para as faces expostas ao ambiente (3.3), e as condições iniciais (3.4) definidas como:

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial \eta} = h(T - T_\infty) \quad (3.3),$$

nas superfícies remanescentes, sendo a temperatura inicial

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

onde, k é a condutividade térmica, q_0'' é o fluxo de calor, η a normal para todas as coordenadas x , y e z , T_∞ é a temperatura ambiente de todo o conjunto, T_0 é a temperatura inicial de todo o conjunto e h o coeficiente de transferência de calor por convecção.

A solução do problema direto associado ao problema de usinagem em estudo passa pela resolução da equação (3.1) e pelo conhecimento do valor de $q_0''(t)$. Porém, a proposta deste trabalho é estimar o fluxo térmico por meio da medição da temperatura em regiões disponíveis da ferramenta durante a operação de torneamento. Este procedimento caracteriza um problema inverso de condução de calor cuja técnica de solução será baseada no método da Inferência Bayesiana e o no Teorema de Bayes.

3.1.2 Solução Numérica: Discretização

A modelagem tridimensional do conjunto ferramenta e suporte da ferramenta foi implementada a partir da construção geométrica do conjunto ferramenta e porta-ferramenta utilizando o software *SolidWorks* para uma posterior importação para o *COMSOL*. A solução numérica é feita a partir da resolução da equação 3.1, possibilitando a estimativa do fluxo de calor para a ferramenta com e sem revestimento.

Essa estimativa foi baseada na média de todas as temperaturas máximas obtidas em cada uma das configurações de testes. Para isso, nos dados de entrada das estimativas foram colocados valores aleatórios de fluxo de calor para alcançar uma faixa de temperatura condizente com a média da temperatura máxima experimental. Esses dados levaram em consideração as condições de contorno envolvidas nos testes experimentais, como resistência térmica no contato ferramenta e no suporte, a convecção de calor na maior parte do conjunto e o fluxo de calor, objeto a ser estimado, no contato ferramenta-peça.

O suporte da ferramenta foi modelado como um aço 1045, com todas as propriedades padrões do software, como a condutividade e difusividade térmica, massa específica e capacidade térmica. A ferramenta modelada como metal duro (WC-Co) e os únicos dados alterados foram o da condutividade e da difusividade térmica que foram usados baseados nos resultados obtidos por Santos Junior (2022d). A Figura 3.3 apresenta uma representação da malha usada e a tabela 1 apresenta os dados de entrada utilizados no software para o inserto.

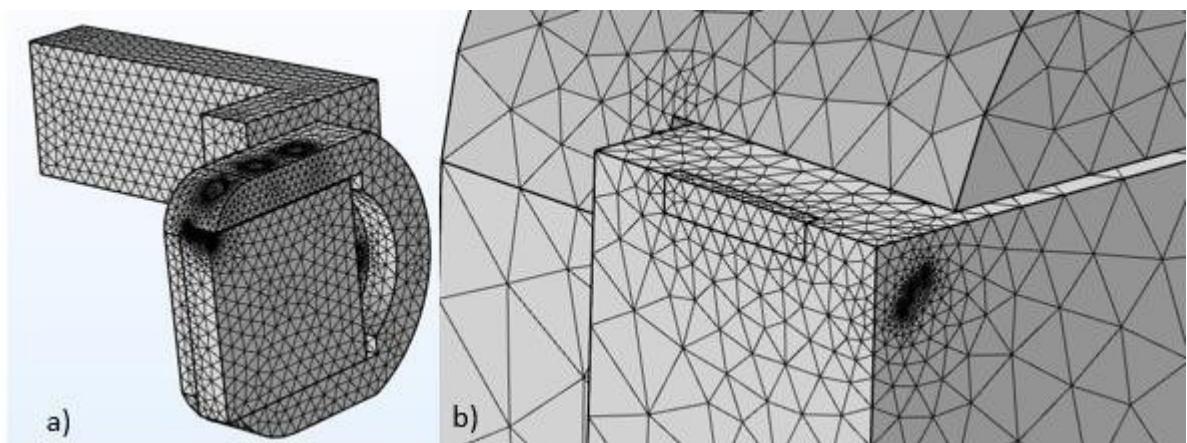


Figura 3.3 - Malha usada para a solução do problema direto, em a) o conjunto completo, em b) detalhe da malha na aresta de corte e nos termopares. Fonte: Autoria Própria.

Tabela 1 – Dados de entrada utilizados no software para a ferramenta de corte:

Variáveis	Ferramenta com Revestimento	Ferramenta sem Revestimento
Difusividade térmica (α)	$2,67 \cdot 10^5$ [m ² /s]	$2,64 \cdot 10^5$ [m ² /s]
Condutividade Térmica (k)	121,3 [W/m. K]	121,3 [W/m. K]
Condutividade do Revestimento	21 [W/mK]	-----
Coeficiente convectivo (h)	5 [W/m ² . K]	5 [W/m ² . K]
Temperatura inicial (T_0)	298,15 [K]	298,15 [K]
Fluxo estimado	$6 \cdot 10^6$ [W/m ²]	$2,35 \cdot 10^7$ [W/m ²]
Revestimento	Nitreto de Titânio [TiN]	-----
Material	Carboneto de Tungstênio	Carboneto de Tungstênio

Os valores de fluxo aleatórios estimados com revestimento, apresentados na tabela 3.1, se aproximaram da temperatura média máxima experimental, 365 K, ou 90°C, quando o fluxo foi de aproximadamente $6 \cdot 10^6$ [W/m²], como mostra a Figura 3.4. E o fluxo para a ferramenta sem revestimento, na Figura 3.5, para uma média de 475 K, temperatura de 201°C, quando o fluxo aleatório foi de aproximadamente $2,35 \cdot 10^7$ [W/m²].

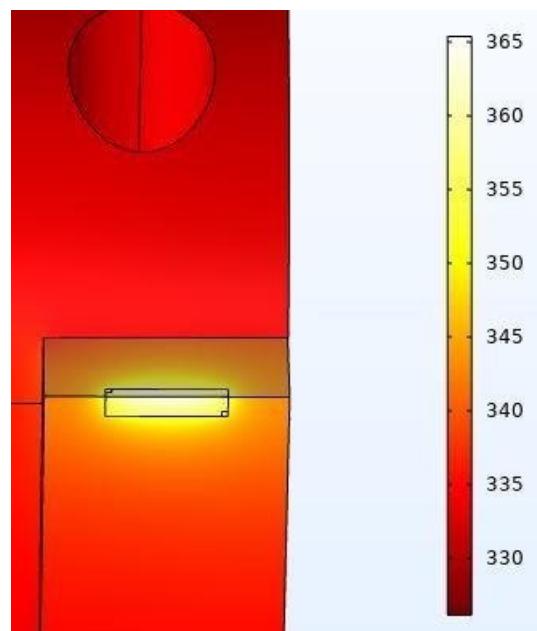


Figura 3.4 - Temperatura estimada para um fluxo de $6 \cdot 10^6$ W/m². Fonte: Autoria Própria.

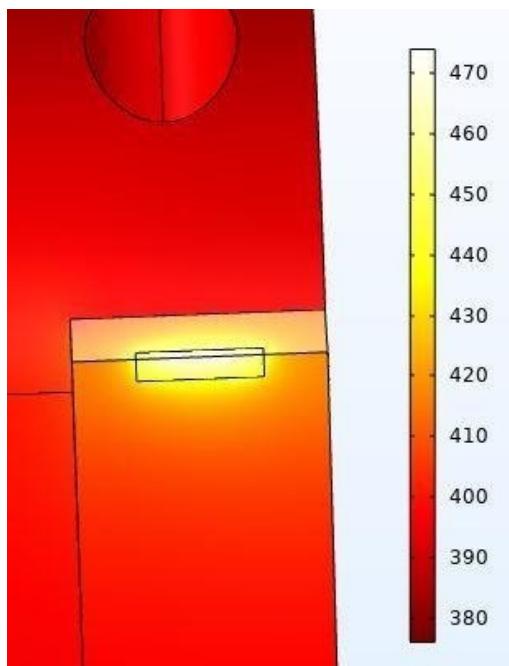


Figura 3.5 - Temperatura estimada para um fluxo de $2,35 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$. Fonte: Autoria Própria.

Esses valores de fluxo estimados indicam a influência do revestimento na diferença entre os dados com e sem revestimento e ainda servem como norte para a próxima etapa, a estimativa do fluxo utilizando o método de solução de problemas inversos em condução de calor.

3.2 Problema Inverso

Os revestimentos são usados nas ferramentas de corte dentro dos diversos processos na usinagem, como torneamento, fresamento e furação, com a intenção de prolongar a vida útil do substrato controlando parâmetros como a temperatura e os efeitos tribológicos. Este trabalho busca analisar a diferença do comportamento térmico de uma mesma ferramenta de aço duro com e sem o revestimento durante o processo de usinagem ortogonal, para avaliar e validar os efeitos do revestimento na condutividade térmica e dissipação de calor na ferramenta.

A técnica de amostragem dada pela Inferência Bayesiana é o procedimento proposto, nesse trabalho, para a obtenção da solução do problema inverso descrito, considerando as ferramentas com e sem revestimento. Nesse sentido, apresenta-se a seguir uma breve descrição dessa técnica estatística.

3.2.1 A Inferência Bayesiana

A Inferência Bayesiana apresenta os seguintes princípios (Kaipio e Somersalo, 2004):

- Todas as variáveis incluídas no modelo são modeladas como variáveis aleatórias.
- A aleatoriedade descreve o grau de informação sobre as suas realizações.
- O grau de informação relativa a estes valores é codificado em termo de distribuições de probabilidades
- A solução do problema inverso é a distribuição de probabilidade posterior. O Teorema de Bayes que relaciona os dados experimentais das temperaturas medidas Y (vetor) e o vetor de parâmetros desconhecidos β é descrito como:

$$P(\beta|Y) = \frac{P(Y|\beta)P(\beta)}{P(Y)} \quad (4.0),$$

Onde $P(\beta|Y)$ é a função de densidade de probabilidade a posteriori, $P(Y|\beta)$ é a função de verossimilhança, $P(Y)$ é a constante de normalização, ou função de densidade de probabilidade marginal das medidas e $P(\beta)$ é a distribuição a priori, ou função de densidade de probabilidade a priori, geralmente sendo uma informação subjetiva.

O termo $P(Y|\beta)$ representa a probabilidade de obter Y para um valor assumido de β . Obtido a partir de uma solução do problema direto e convertido para uma PDF (função de densidade de probabilidade). Incorpora-se a informação de $P(\beta)$ na análise quando se tem algum conhecimento sobre os parâmetros de interesse na inferência Bayesiana. No presente problema de transferência de calor o parâmetro β será a difusividade térmica e a condutividade térmica. Assim, emprega-se a inferência Bayesiana para que as temperaturas obtidas experimentalmente e a distribuição de temperatura simulada para diferentes valores de propriedades, sejam as mais próximas possíveis.

Por $P(Y)$ ser uma constante de normalização a função de densidade de probabilidade a posteriori é escrita como sendo proporcional ao produto da verossimilhança e da distribuição a priori.

$$P(\beta|Y) = \frac{1}{cte} P(Y|\beta)P(\beta) \propto P(Y|\beta)P(\beta) \quad (4.1),$$

Considerando que os dados de temperatura são independentes e identicamente distribuídos, a verossimilhança é escrita como:

$$P(Y|\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(\frac{(Y - T(\beta))^T (4.2) T(\beta))}{2\sigma^2}\right) \quad (4.2)$$

onde $T(\beta)$ é a temperatura calculada em função dos parâmetros a serem estimados, de forma analítica, Y tem dimensão das n medidas disponíveis e σ^2 é a variância das medidas experimentais Y . As hipóteses estatísticas para as estimativas da verossimilhança são: erros de medidas aditivos, $Y_{medido} = Y_{simulado} + \varepsilon$, não-correlacionados, com distribuição normal ou gaussiana, média zero e desvio padrão constante σ . A equação anterior torna-se:

$$P(Y|\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\left(\frac{\chi^2}{2}\right)\right) \quad (4.3)$$

onde:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{(T_i - Y_i)^2}{\sigma^2} \right) \quad (4.4),$$

Na equação (4.4) T_i são os valores simulados de Y para um β assumido. E Y_i são os dados de temperatura medidos. A distribuição a priori, $P(\beta)$, segue tipicamente uma distribuição uniforme, normal ou log-normal. No caso de uma distribuição uniforme, $P(\beta)$ é o mesmo para todos os valores de β , ou seja, não apresenta absolutamente nenhuma preferência seletiva que é considerada "não informativa".

Para uma distribuição a priori uniforme, ou seja, $P(\beta)$ é igual a 1, a função de densidade de probabilidade a posteriori (PPDF) é a própria PDF, assim:

$$P(Y|\beta) = P(Y|\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\left(\frac{\chi^2}{2}\right)\right) \quad (4.5),$$

O que é semelhante a estimativa de mínimos quadrados para o caso linear e não-linear. Mas a distribuição a priori pode regularizar os problemas inversos mal-postos significativamente, o que auxilia no processo de estimativa de parâmetros. Para uma distribuição a priori normal $P(\beta)$ com parâmetros com média μ_p e desvio padrão σ_p , têm-se:

$$P(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_p^2}} \exp\left(-\frac{(X-\mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right) \quad (4.6),$$

Substituindo a Equação (4.6) na Equação (4) e sabendo que:

$$P(Y) = \int P(Y|\beta) \cdot P(\beta) dx \quad (4.7),$$

A PPDF para uma distribuição gaussiana torna-se:

$$P(\beta|Y) = \frac{\exp -\left(\frac{x^2}{2} + \frac{(\beta - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right)}{\int \exp -\left(\frac{x^2}{2} + \frac{(\beta - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right) dx} \quad (4.8),$$

Não é necessário realizar o cálculo do denominador da equação anterior, já que se trata de uma densidade marginal e que a distribuição conjunta não está disponível em primeira instância. Um estimador frequentemente utilizado é o MAP (Máximo a posteriori), e é calculado como:

$$\beta_{MAP} = \arg \max [P(\beta|Y)] \quad (4.9),$$

Esse estimador permite identificar dentre os parâmetros β 's testados qual apresentou melhor concordância entre a temperatura experimental Y e a temperatura calculada a partir desses parâmetros. Para dados discretos, a média e a variância dos parâmetros estimados são calculados respectivamente, por:

$$\bar{\beta} = \frac{\sum_i \beta_i \exp -\left(\frac{x^2}{2} + \frac{(\beta - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right)}{\sum_i \exp -\left(\frac{x^2}{2} + \frac{(\beta - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right)} \quad (4.10),$$

$$\sigma_{\beta}^2 = \frac{\sum_i (\beta_i - \bar{\beta})^2 \exp - \left(\frac{x^2}{2} + \frac{(\beta - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2} \right)}{\sum_i \exp - \left(\frac{x^2}{2} + \frac{(\beta - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2} \right)} \quad (4.11),$$

Com base no procedimento proposto neste estudo, β_i , ($\beta_i = q_0$) é estimado aplicando o teorema de Bayes, que também é a solução para problemas de estimativa de parâmetros dados pelo estimador de máximo a posteriori. Deve-se mencionar aqui que o estimador de máximo a posteriori se reduz ao estimador de máxima verossimilhança dentro do espaço de parâmetros dado pela distribuição a priori uniforme.

Apesar de sua similaridade, é importante enfatizar a distinção entre estimadores clássicos e bayesianos. Os primeiros são estatísticos e, portanto, possuem uma distribuição amostral a partir da qual suas propriedades serão estabelecidas. Os estimadores bayesianos baseiam-se na distribuição a posteriori que é sempre condicional ao valor observado da amostra e, portanto, suas propriedades baseiam-se na distribuição a posteriori, um objeto totalmente diferente. No entanto, podem ser vistos como funções da amostra observada e, desta forma, comparados numericamente com a estimativa clássica (Migon, et al., 2015).

3.2.2 Estimativa do Fluxo de Calor

Será realizada a estimativa do fluxo de calor utilizando a abordagem bayesiana a partir de dois modelos desenvolvidos para cada uma das duas configurações de testes, com e sem revestimento, e posteriormente será feita comparação e análise dos dados estimados.

3.2.3 Modelo térmico 1: Hipótese de fluxo de calor constante durante todo o torneamento

A solução do problema direto foi obtida considerando no modelo térmico um fluxo de calor constante na interface de corte peça-ferramenta. Essa consideração aplicou-se a ambas as ferramentas, com e sem revestimento. No processo de estimativa usando a inferência Bayesiana, os valores de fluxo de calor foram então assumidos de característica aleatória conforme descrito na seção 3.2.1.

3.2.4 Modelo térmico 2: Fluxo de calor variável com o tempo na interface de corte peça-ferramenta

Analogamente a estimativa do modelo térmico 1, a Inferência Bayesiana também foi usada para a estimativa do fluxo de calor imposto na ferramenta. A diferença, nesse caso, é o tratamento variável com o tempo ao fluxo de calor. Ou seja, o fluxo de calor imposto foi discretizado em intervalos de tempos de 1s sendo obtidos para cada tempo uma estimativa do fluxo de calor temporal q_i .

Os resultados de fluxo de calor e campo de temperatura estimados nos dois casos são apresentados e discutidos nos próximos capítulos, assim como a apresentação dos dados obtidos experimentalmente. Vale ressaltar, no entanto, que embora tenha sido medido as temperaturas em três posições, apenas os sinais de temperatura do termopar mais próximo à interface foram usados. Esse procedimento se deveu exclusivamente para evitar o custo computacional do uso da técnica de inferência Bayesiana a ser avaliada em diversos pontos de medição. Todavia, não houve comprometimento dos resultados.

CAPÍTULO IV

4. METODOLOGIA

Os procedimentos para obtenção e análise dos dados foram desenvolvidos no Laboratório de ensino e pesquisa em Transferência de Calor, Modelagem e Experimento (LTCME) e em conjunto, para a etapa de testes, no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia.

A ferramenta de corte utilizada para a análise é um inserto de metal duro, composto de carboneto de tungstênio e cobalto (WC-Co) e revestido por uma camada de TiN (nitreto de titânio). Esse tipo de revestimento é fabricado por deposição física de vapor (PVD), foi escolhido por ser um dos tipos de revestimentos mais usados na indústria e por fornecer uma boa resistência aos mecanismos de desgaste (Balzers, 2021), conforme revisado no capítulo 2. O presente trabalho utiliza-se dos dados obtidos da condutividade térmica para o inserto de metal duro estimados e da própria ferramenta usada por Santos Junior (2022) em sua tese de doutorado, configurando-se como um aprofundamento dos estudos e uma contribuição para as áreas de transferência de calor e usinagem por torneamento. A tabela 2 apresenta as informações relativas à composição química do carboneto de tungstênio (WC-Co), bem como sua dureza antes e depois do revestimento.

Tabela 2 - Composição química do inserto de carboneto de tungstênio (WC-Co).

Elemento	Peso %	Desvio Padrão, σ	Atômico %	Dureza Vickers, HV
Carbono	12,657	0,144	66,578	
Cobalto	4,677	0,076	5,0147	
Tungstênio	82,665	0,152	28,407	
Sem Revestimento			$1695,84 \pm 1,63\%$	
Com Revestimento de TiN			$2056,9 \pm 7,4\%$	

Fonte: Santos Junior (2022f).

Os experimentos são realizados em duas etapas e serão detalhados a seguir. A primeira consiste na usinagem com a ferramenta revestida e a segunda com a ferramenta sem o revestimento, para posterior comparação dos resultados. Os testes foram realizados

no torno CNC Romi, da Figura 4, disponível no LEPU, para que os parâmetros como a velocidade de corte, o avanço, a rotação e a profundidade de corte se mantivessem constantes durante a usinagem, como mostra a tabela 3. Desenvolveu-se, nesse sentido, um programa CNC na linguagem ISO.



Figura 4 - Torno CNC Romi. Fonte: Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU).

Tabela 3 - Parâmetros de utilizados para os experimentos:

Parâmetros de Usinagem	Testes com Revestimento	Testes sem Revestimento
Velocidade de corte	140 m/min	140 m/min
Avanço	0,12 mm/rot	0,12 mm/rot
Profundidade de corte	13 mm	13 mm
Diâmetro inicial	72 mm	54 mm
Diâmetro final	59 mm	41 mm
Espessura do disco	5 mm	5 mm

Fonte: Autoria Própria.

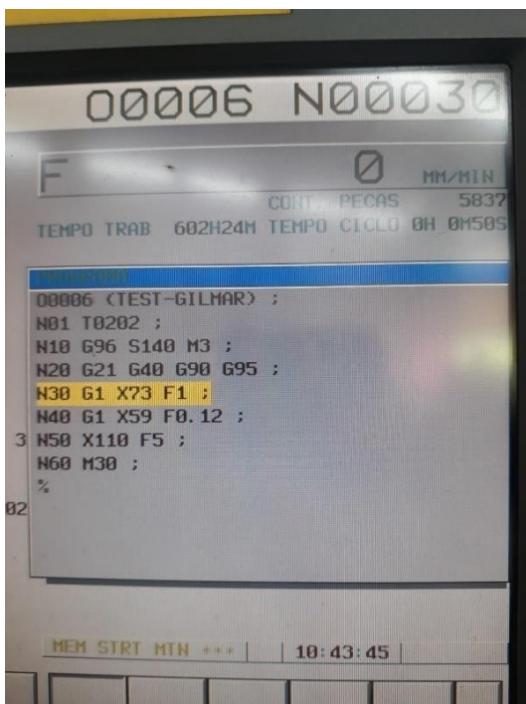


Figura 4.1 - Programa CNC na linguagem ISSO. Fonte: Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU).

A Figura 4.1 mostra a interface da máquina CNC com a programação manual do comando numérico para a usinagem dos testes com o revestimento. De acordo com a norma ISO 6983, cada linha da programação indica uma função específica para o torno CNC realizar deslocamentos, acionar modos e ativar parâmetros de corte. Na Figura é possível identificar a velocidade de corte, S140, o avanço, em F0.12, o diâmetro inicial de 72 mm, representado como X73, representando a aproximação da ferramenta de corte à peça antes da usinagem e o diâmetro final de 59 mm, em X59. O sistema de coordenadas no torno é composto pelo eixo X, que representa o deslocamento no diâmetro e Z, no comprimento, como a usinagem foi feita em canais, apenas o eixo X foi representado, e o posicionamento em Z foi feito manualmente.

O material da peça a ser usinada é de ferro fundido cinzento. Este foi escolhido por ser um metal versátil e de baixo custo (De Sousa; et al., 2018), além do fato da sua microestrutura se organizar em flocos, deixando o material frágil à esforços de tração, mas ainda assim resistentes à esforços compressivos e aos mecanismos de desgaste (Trent; Wright, 2000), fazendo com que esse tipo de material apresente maior e melhor usinabilidade (França, 2021).

A peça foi preparada em forma de discos, Figura 4.3, e usinada em canais axiais, Figura 4.4. No total, foram preparados 20 testes para cada configuração, a primeira com a ferramenta revestida e a segunda com a ferramenta sem o revestimento, Fig. 4.5.



Figura 4.2 - Preparação dos discos a serem usinados com um bedame. Fonte: Autoria Própria.

A preparação dos corpos de prova foi feita diariamente e cada disco preparado repousava durante vinte e quatro horas para evitar a inércia térmica, Figura 4.3. A execução dos testes dos testes seguiu o mesmo procedimento. Cada disco previamente preparado, era usinado uma vez por dia para que a inércia não influenciasse o comportamento térmico do processo.

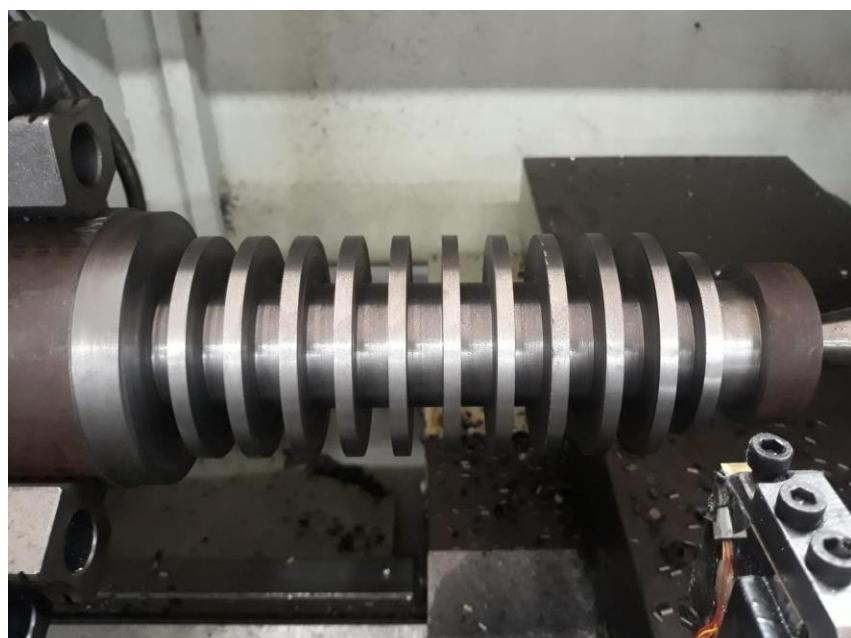


Figura 4.3 - Imagem dos discos de ferro fundido preparados para a usinagem com a ferramenta de metal duro já montada. Fonte: Autoria própria.

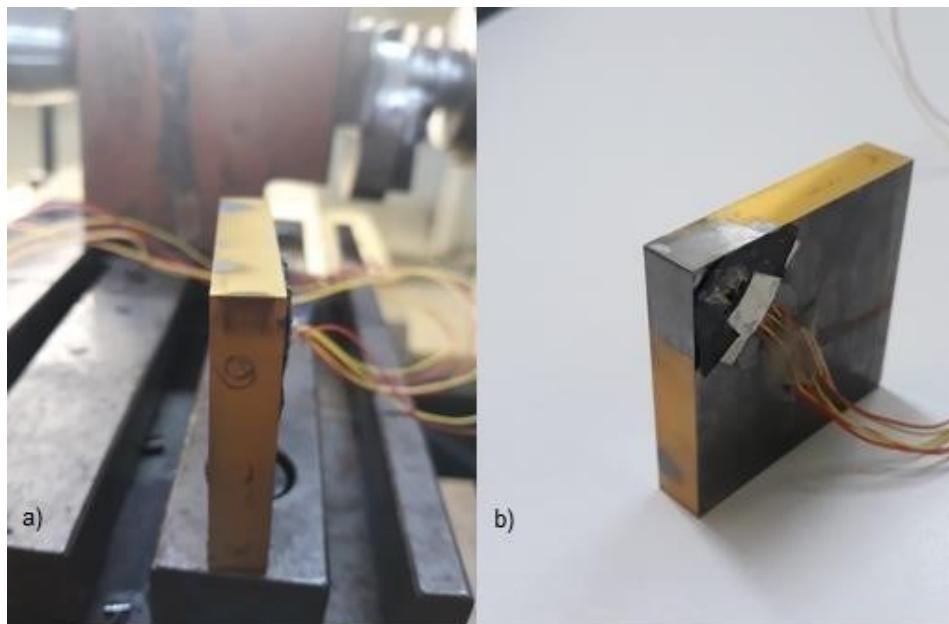


Figura 4.4 - Ferramenta revestida (a) e ferramenta sem revestimento (b). Fonte: Autoria Própria.

Fixaram-se na superfície da ferramenta três termopares do tipo K (AWG 36, $1000 \pm 0,8$ mm de comprimento) (Figura 4.5) através de uma descarga capacitiva próxima a área de contato entre a ferramenta e a peça. Descrevem-se as localizações de cada um deles na tabela 4. Os sinais dos termopares foram coletados pelo sistema de aquisição de dados (LXI *Data Acquisition / Switch Unit*) da *KeySight*, durante o processo de usinagem. Realizada a fase de testes com o torneamento da ferramenta revestida, os dados foram tratados no Excel para processamento filtragem de informações.

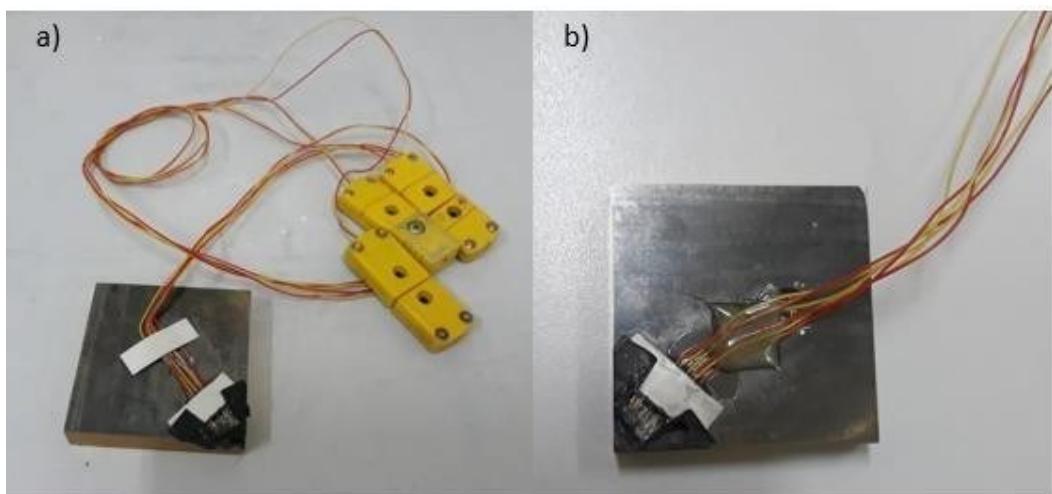


Figura 4.5 - Ferramenta com os termopares do tipo K soldados (a). Termopares soldados (b). Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 4.5 é possível identificar os três termopares do tipo K soldados próximos à área de contato entre ferramenta e peça, para a obtenção dos dados da temperatura experimental. Além da fixação por descarga capacitiva, foram colocadas cola instantânea, cola epóxi e fita isolante para auxiliar na estabilização dos termopares durante a usinagem, como um método de evitar a soltura dos termopares devido à grande vibração do processo. A Figura 4.6, demonstra o conjunto completo, ferramenta, com os termopares, e suporte da ferramenta.

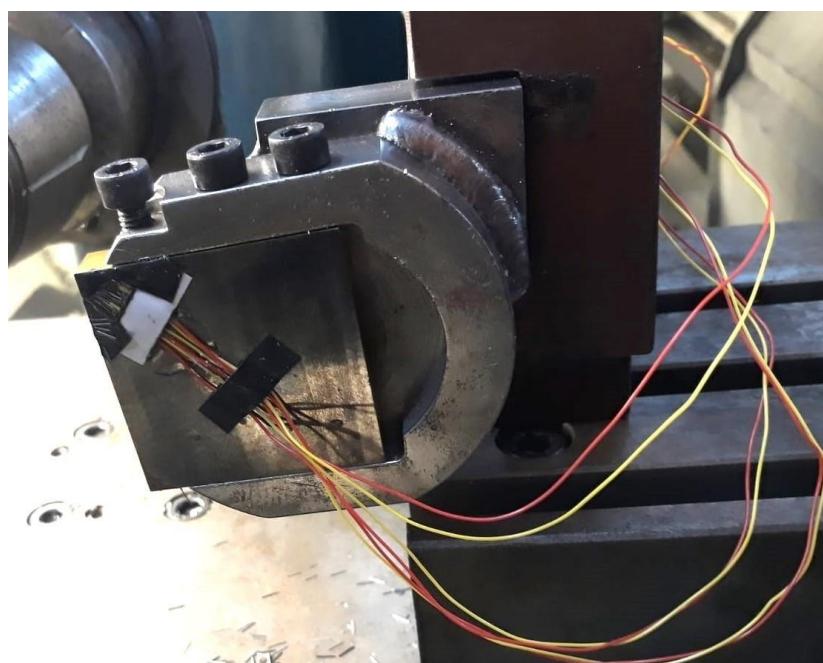


Figura 4.6 - Conjunto ferramenta, suporte da ferramenta e termopares. Fonte: Autoria Própria.

Tabela 4 - Posições dos termopares para os testes com revestimento de acordo com o eixo de coordenadas da Figura 3.2.

Posição / Eixo	X	Y	Z
1	1,92 mm	10 mm	1,87 mm
2	1,53mm	10 mm	1,43 mm
3	1,31 mm	10 mm	1,35 mm

Fonte: Autoria Própria.

Na segunda etapa, a ferramenta revestida foi retificada para retirada da camada fina de nitreto de titânio (TiN) sobre a superfície. Para isso, os termopares também foram removidos da superfície e uma nova tabela de posições (Tabela 5) foi desenvolvida para estes testes.

Tabela 5 - Posições dos termopares para os testes sem revestimento de acordo com o eixo de coordenadas da Figura 3.2

Posição / Eixo	X	Y	Z
1	1,48 mm	10 mm	1,56 mm
2	1,61 mm	10 mm	1,83 mm
3	1,72 mm	10 mm	1,95 mm

Fonte: Autoria Própria.

A área da superfície de contato $q_0''(t)$ foi estimada a partir de imagens capturadas por um estereomicroscópio após a realização das duas configurações de testes. Para simplificar a visualização, essa superfície foi dividida em duas partes, a Figura 4.7 representa a visão da face inferior da aresta de corte principal. Esta região apresentou maior área de contato em comparação com a Figura 4.8, que demonstra a face superior à aresta. Estas duas regiões foram usinadas e sofreram atrito ao mesmo tempo durante a usinagem e serão utilizadas juntas para estimar, posteriormente no capítulo 6, o fluxo de calor gerado nessa região do contato peça-ferramenta. Ambas foram aproximadas ao formato de um retângulo e calculadas como tal.

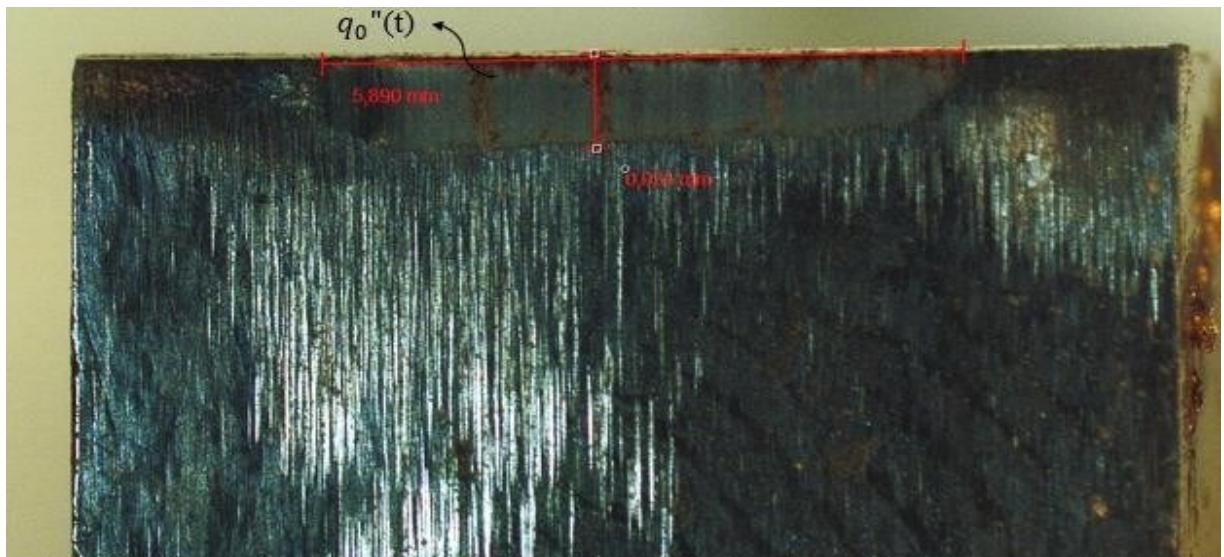


Figura 4.7 - Área de contato da ferramenta durante a usinagem do ferro fundido estimada em $5,507 \text{ mm}^2$. Fonte: Autoria Própria.

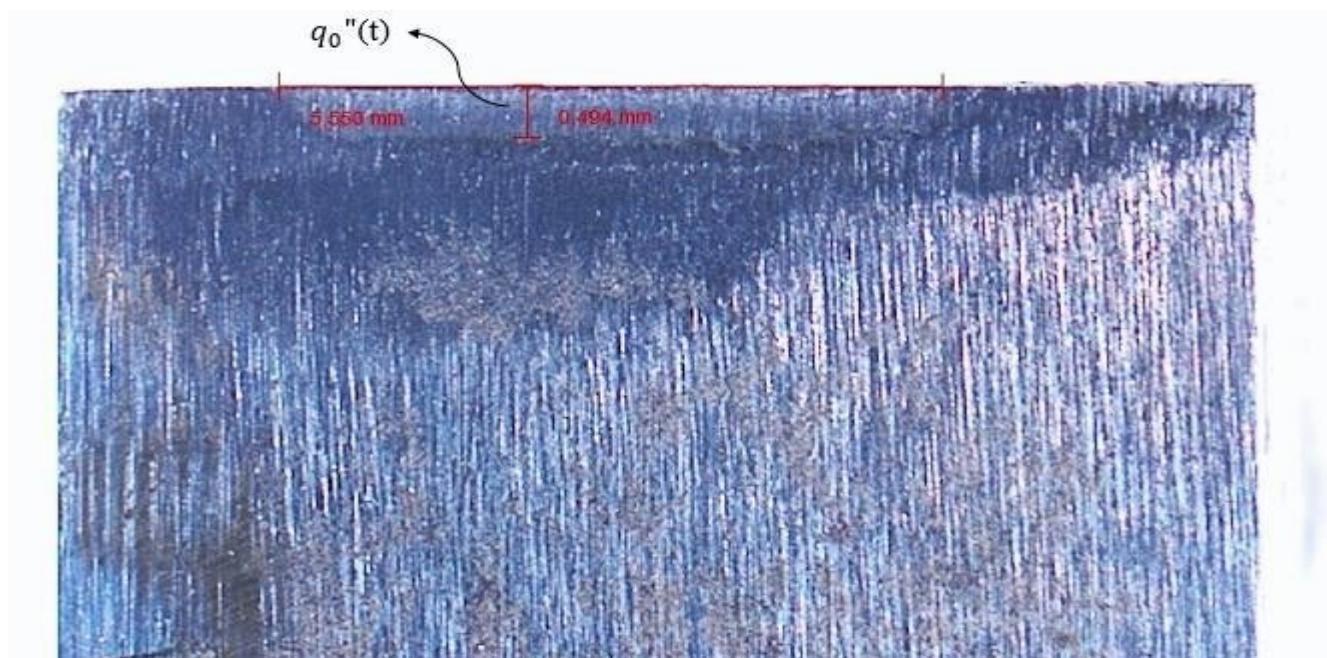


Figura 4.8 - Área de contato da ferramenta durante a usinagem do ferro fundido estimada em $2,741 \text{ mm}^2$. Fonte: Autoria Própria.

Com os dados obtidos experimentalmente e os dados estimados numericamente no COMSOL, conforme explorado no capítulo 3, foi possível realizar a análise e a comparação entre a ferramenta com e sem revestimento. No próximo capítulo, serão apresentados todos os resultados experimentais e estimados.

CAPÍTULO V

5. RESULTADOS

Apresentam-se neste capítulo as temperaturas medidas experimentalmente na ferramenta com e sem revestimento, assim como a solução numérica do problema direto mostrado no capítulo 3. Discutem-se também, os campos de temperatura estimados a partir da solução do problema inverso utilizando a abordagem bayesiana.

5.1 Resultados Experimentais

De acordo com o procedimento descrito no capítulo 4, foram realizados 20 testes com a ferramenta de metal duro revestida por TiN e outros 20 testes para a ferramenta sem revestimento. As duas configurações de testes foram feitas no mesmo tempo de usinagem. Na tabela 6 estão expostos os valores, amostrais e o valor da média de todos os 20 testes, de temperatura obtidas para os experimentos 1, 5, 10, 15 e 20 durante a usinagem do ferro fundido cinzento com a ferramenta revestida para cada passo de tempo. Dos três termopares fixados à superfície da ferramenta, serão analisadas apenas as temperaturas obtidas para o termopar que possui a posição mais próxima da superfície de contato, para os testes experimentais com revestimento. O termopar escolhido foi o T3.

Tabela 6 - Temperaturas obtidas nos testes experimentais para o termopar 3 (T3).

	Teste 1	Teste 5	Teste 10	Teste 15	Teste 20	Média
Tempo	T3	T3	T3	T3	T3	T3
s	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	23,829	24,107	26,565	24,326	24,854	24,723
0.75	23,842	24,098	27,007	24,332	24,831	24,743
1.5	24,575	24,856	29,272	24,306	24,851	25,171
2.25	31,689	28,938	33,397	24,496	24,926	27,324
3	41,161	34,786	38,452	27,038	27,340	31,650
3.75	50,944	41,415	44,394	32,214	32,835	37,745
4.5	60,403	48,174	50,831	38,602	39,603	44,627
5.25	69,245	55,062	57,092	45,286	47,182	51,692
6	77,402	61,871	63,243	52,371	54,566	58,732
6.75	84,664	68,167	69,636	59,010	61,596	65,495
7.5	90,426	74,288	75,631	65,416	68,379	71,856
8.25	95,011	80,290	81,258	71,875	75,101	77,938
9	98,625	86,093	86,805	77,815	81,292	83,671
9.75	101,502	91,133	90,329	82,267	86,892	88,451
10.5	102,763	93,776	91,245	84,097	89,110	90,509
11.25	100,304	93,310	90,546	83,992	88,938	90,010
12	95,804	90,877	88,704	82,643	87,364	87,946

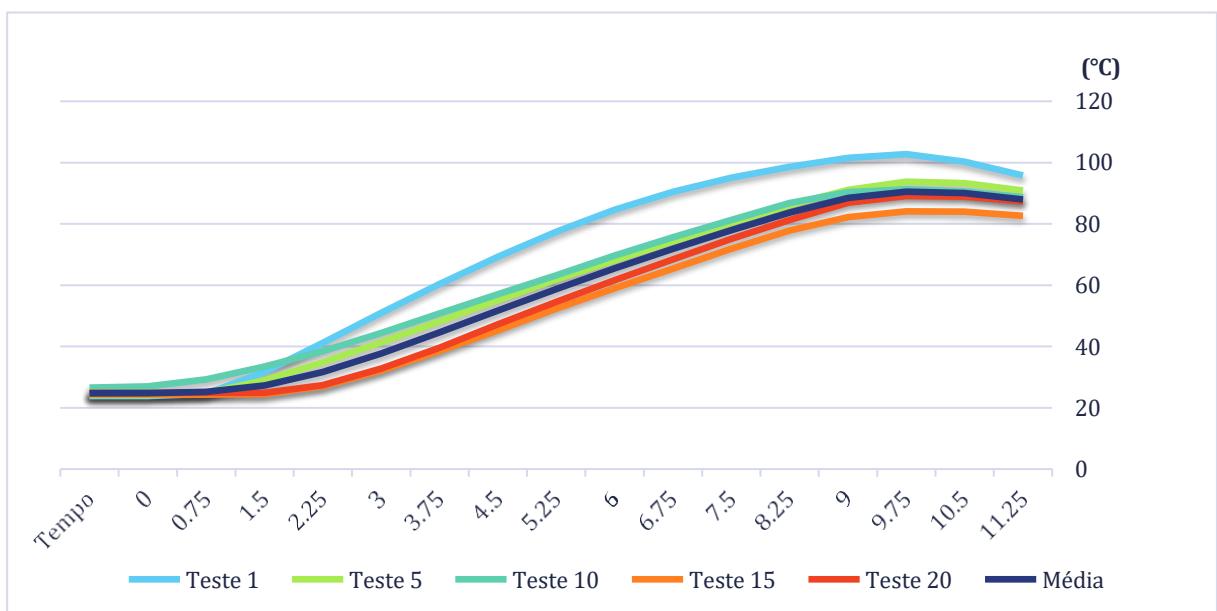


Figura 5 - Comportamento da temperatura experimental durante a usinagem com revestimento. Fonte: Autoria Própria.

Comparando-se os experimentos, observa-se que o teste 1 foi o que apresentou a maior temperatura máxima, (102 °C), e o teste 15 foi o que apresentou a menor temperatura máxima, (84 °C). Considerando ainda os outros testes, eles apresentaram uma faixa de valores semelhante, com menor variação de temperatura máxima entre 80 e 100 °C. A tabela apresenta também os dados da temperatura média para os 20 testes, indicando uma diferença de até 12 °C da temperatura máxima obtida. O comportamento dessa temperatura para a ferramenta revestida é apresentado na Figura 5. Durante o período de usinagem, no tempo 0 segundos, a ferramenta está fazendo o movimento de aproximação da peça e o início do contato se dá entre os tempos 0,75 a 1,5 segundos, ponto que se pode notar um aumento da temperatura. O tempo que oferece o auge da temperatura é o de 10,5 segundos em um tempo total de 12 segundos, após esse tempo, há uma queda brusca da temperatura.

O termopar 3 (T3), foi escolhido devido a sua posição mais próxima da interface em contato com a peça e na Figura 5.1 e na Figura 5.2, apresenta a influência da posição do termopar em relação à temperatura medida, onde se observa que quanto mais distante da aresta de corte, menor a temperatura experimental.

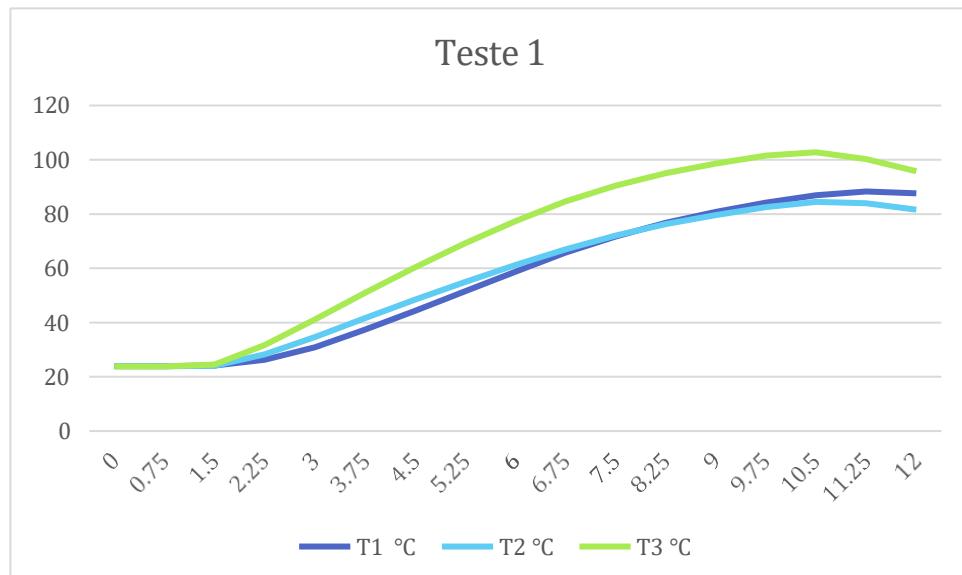


Figura 5.1 - Temperatura experimental para diferentes posições dos termopares para o teste 1 com a ferramenta revestida. Fonte: Autoria Própria.

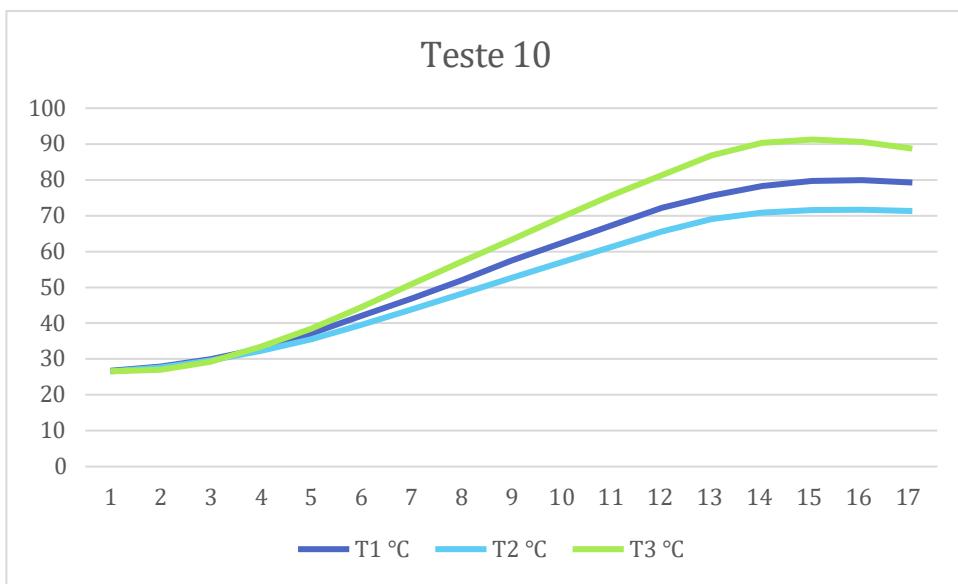


Figura 5.2 - Temperatura experimental para diferentes posições dos termopares para o teste 10 com a ferramenta revestida. Fonte: Autoria Própria.

Os parâmetros de usinagem foram mantidos os mesmos, assim como o intervalo de tempo de medição. Entretanto, para a solução do problema inverso, alterou-se o intervalo de amostragem, porém utilizando-se os dados experimentais medidos com o mesmo intervalo de medição, preservando-se a mesma duração do tempo de usinagem. Esse procedimento se deve ao custo computacional muito superior ao da ferramenta sem revestimento. Observa-se também, que embora tentado, as mesmas posições dos termopares não foram repetidas. Estas sofreram ligeiras alterações devido a remoção do revestimento e das características físicas do processo de adesão dos termopares, que impedem uma reprodução exata da posição.

Novamente, escolheu-se o termopar mais próximo (T1) dos três termopares soldados na ferramenta. Observa-se que para efeito de comparações ele ocupa a mesma referência de posição do termopar 3 (T3) para os testes revestidos.

Na tabela 7 estão expostos os valores, amostrais e o valor da média de todos os 20 testes, de temperatura obtidas, para os testes 1, 5, 10, 15 e 20 sem a presença do revestimento.

Tabela 7 - Amostra das temperaturas obtidas nos testes experimentais para o termopar 1 (T1).

	Teste 1	Teste 5	Teste 10	Teste 15	Teste 20	Média
Tempo	T1	T1	T1	T1	T1	T1
s	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0,5	20,624	20,666	24,187	22,255	24,447	23,699
1	36,689	57,775	65,06	65,824	53,743	52,871
1,5	56,705	80,359	88,609	88,689	81,486	80,347
2	76,004	97,796	106,012	105,602	127,907	100,272
2,5	92,398	111,341	119,722	119,083	136,45	114,599
3	106,224	122,544	130,995	130,13	143,611	126,238
3,5	117,98	132,128	140,353	139,282	149,627	135,855
4	127,983	140,484	148,359	147,032	155,006	144,412
4,5	136,555	147,664	155,241	153,825	159,862	151,554
5	144,009	153,955	161,461	159,896	164,403	157,869
5,5	150,699	159,526	171,668	165,377	168,74	164,254
6	156,613	164,457	175,816	174,564	172,709	170,333
6,5	161,838	172,912	179,7	178,644	176,667	175,587
7	166,419	176,547	183,109	182,252	184,41	180,249
7,5	170,484	179,887	186,251	185,519	187,955	183,974
8	177,477	182,948	189,16	188,425	191,509	187,469
8,5	180,469	188,243	191,72	191,061	194,93	191,278
9	185,588	190,502	196,559	195,91	198,25	194,161
9,5	189,894	192,588	200,42	199,95	203,05	197,410
10	191,775	194,443	202,182	201,589	207,429	200,069
10,5	193,546	196,237	203,616	203,107	208,967	201,690
11	185,428	196,116	185,217	188,998	190,288	189,293
11,5	164,483	175,819	163,132	164,339	168,317	166,763
12	147,057	156,127	146,404	146,207	151,47	148,877

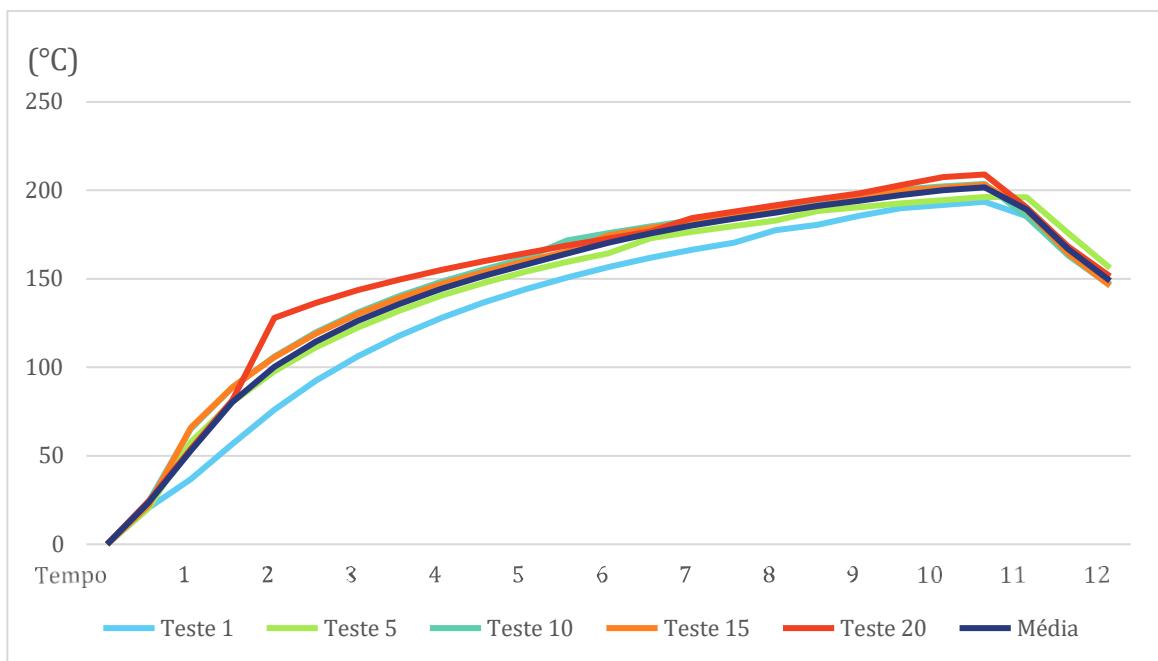


Figura 5.3 - Comportamento da temperatura experimental durante a usinagem sem revestimento. Fonte: Autoria Própria.

Apresentam-se na tabela 7 os dados das temperaturas obtidas experimentalmente durante o processo de usinagem. Dentre estes, o teste 20 apresentou a maior temperatura máxima, 208 °C, enquanto o teste 1 apresentou a menor, 193°C. Levando em consideração todos os testes obtidos, a temperatura máxima foi de 210°C, no décimo sétimo teste, bem próximo da temperatura máxima do teste 20. A tabela apresenta também os dados da temperatura média para os 20 testes, indicando uma diferença de até 9 °C com a temperatura máxima obtida e o comportamento dessa temperatura para a ferramenta sem o revestimento é apresentada na Fig. 5.3.

Similarmente, durante o período de usinagem, no tempo 0 segundos, a ferramenta está fazendo o movimento de aproximação da peça e apresenta-se à temperatura ambiente, o início do contato se dá entre os tempos 0,5 a 1 segundo ponto que se pode notar um aumento considerável da temperatura. O tempo que oferece o auge da temperatura é o de 10,5 segundos em um tempo total de 12 segundos, após esse tempo, há uma queda considerável da temperatura. Analogamente, o termopar 1 (T1), foi escolhido devido a sua posição mais próxima da interface em contato com a peça e nas Figuras 5.4 e 5.5, são apresentados a influência que a posição do termopar tem relação à temperatura obtida.

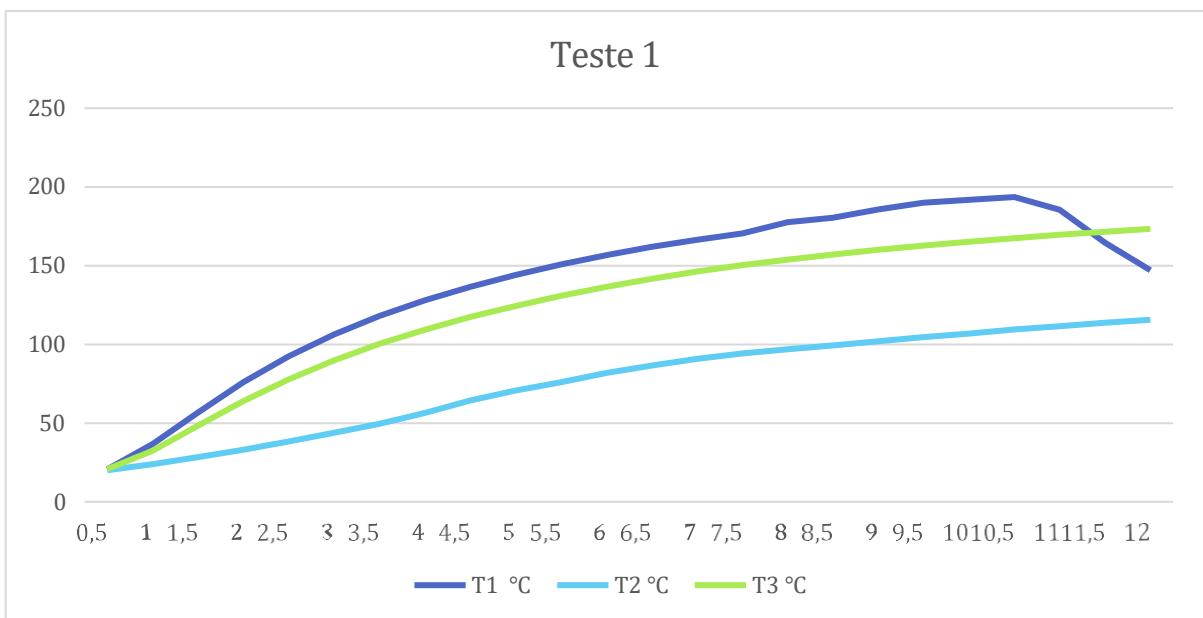


Figura 5.4 - Temperatura experimental para diferentes posições dos termopares para o teste 1 com a ferramenta sem revestimento. Fonte: Autoria Própria.

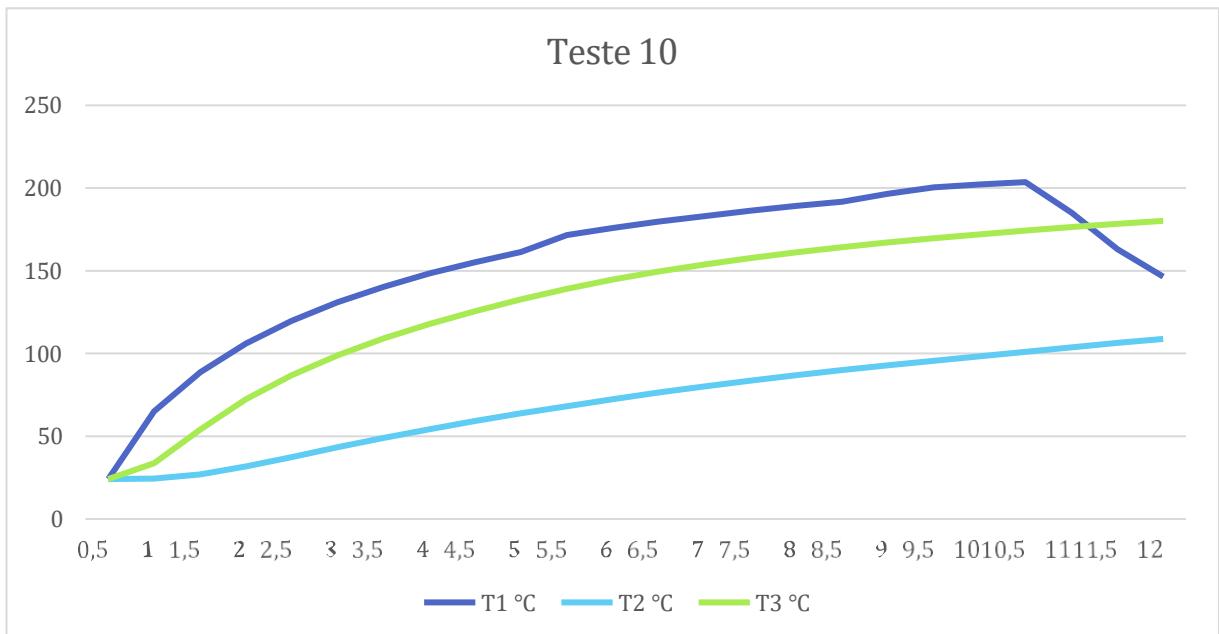


Figura 5.5 - Temperatura experimental para diferentes posições dos termopares para o teste 10 com a ferramenta sem revestimento. Fonte: Autoria Própria.

A partir destes últimos testes foi possível comparar os dois resultados. Comparando-se os testes com e sem revestimento, observa-se que nos testes sem revestimento a temperatura obtida foi cerca de 110°C superior à temperatura da primeira configuração de

testes (temperaturas máximas de 200 °C e de 90 °C respectivamente).

Uma hipótese para essa alta diferença de temperatura se deve à influência que o revestimento apresenta no comportamento tribológico da ferramenta durante a usinagem. Neste caso, alterando inclusive o comportamento da temperatura, Figura 5.6, e a variação de temperatura máxima para os dois tipos de testes, mostradas nas Figuras 5.7 e 5.8.

Observa-se que a variação de temperatura máxima para o revestimento não segue um padrão claro, apresentando pontos específicos de alteração e principalmente faixas suaves de variação, devido ao menor desgaste gerado pela presença do revestimento. Observa-se ainda que para a ferramenta sem revestimento, a variação da temperatura aumentou a cada teste indicando um possível desgaste maior da ferramenta a cada experimento, o que claramente evidencia o efeito tribológico das ferramentas no comportamento do campo de temperatura.

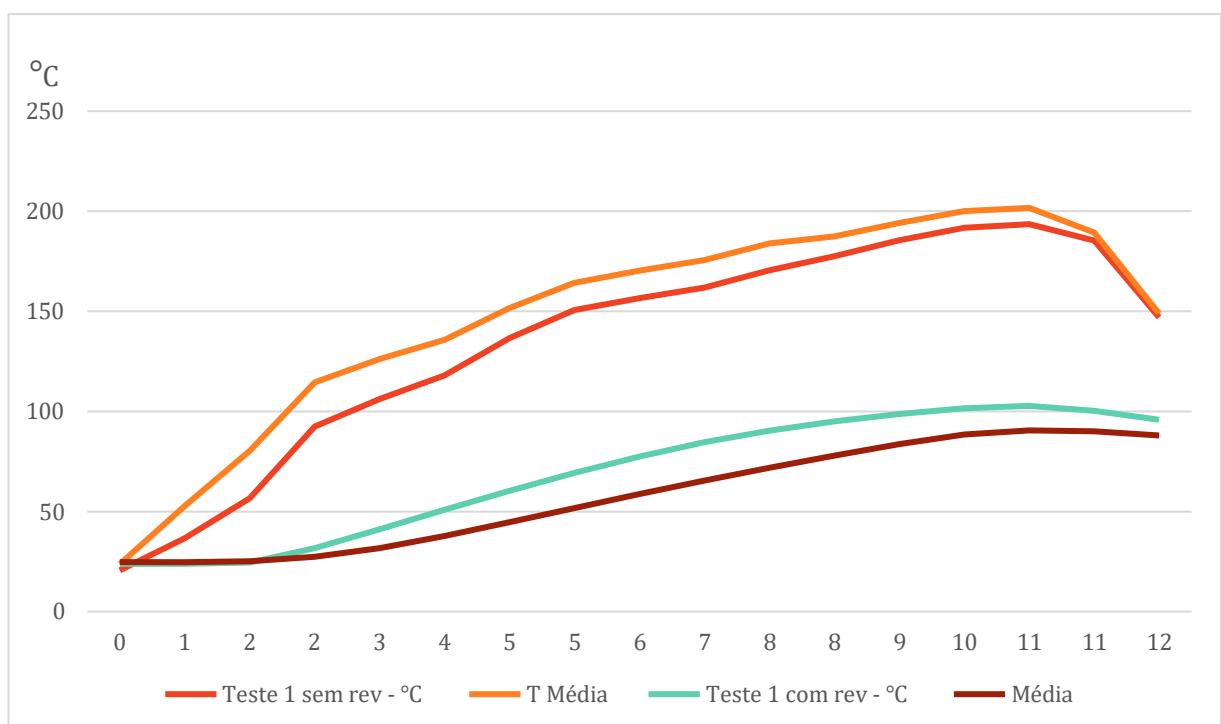


Figura 5.6 - Comparação entre a temperatura experimental com e sem revestimento.

Fonte: Autoria Própria.

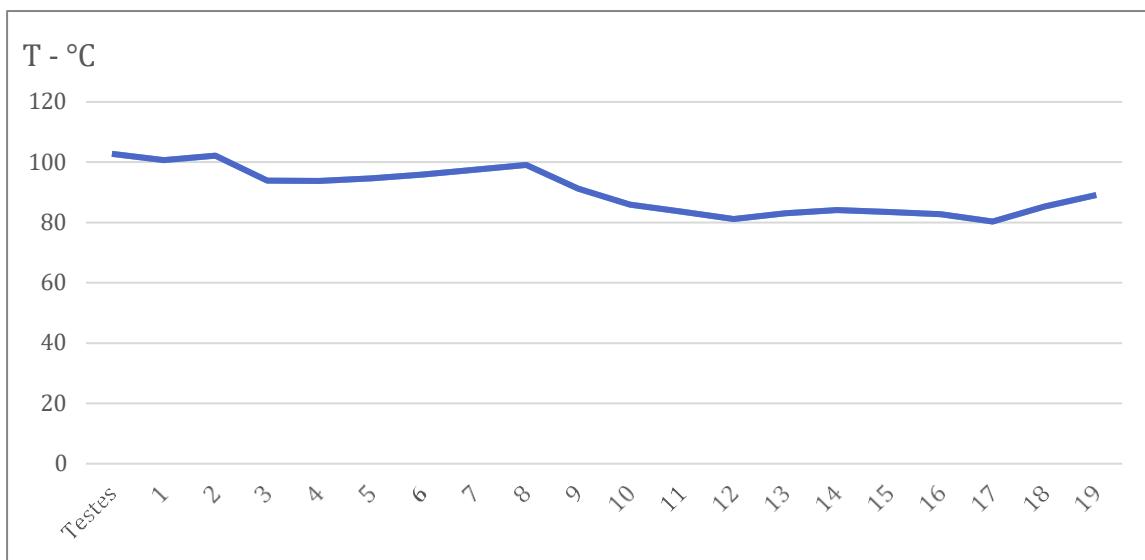


Figura 5.7 - Variação da Temperatura Máxima com revestimento. Fonte: Autoria Própria.

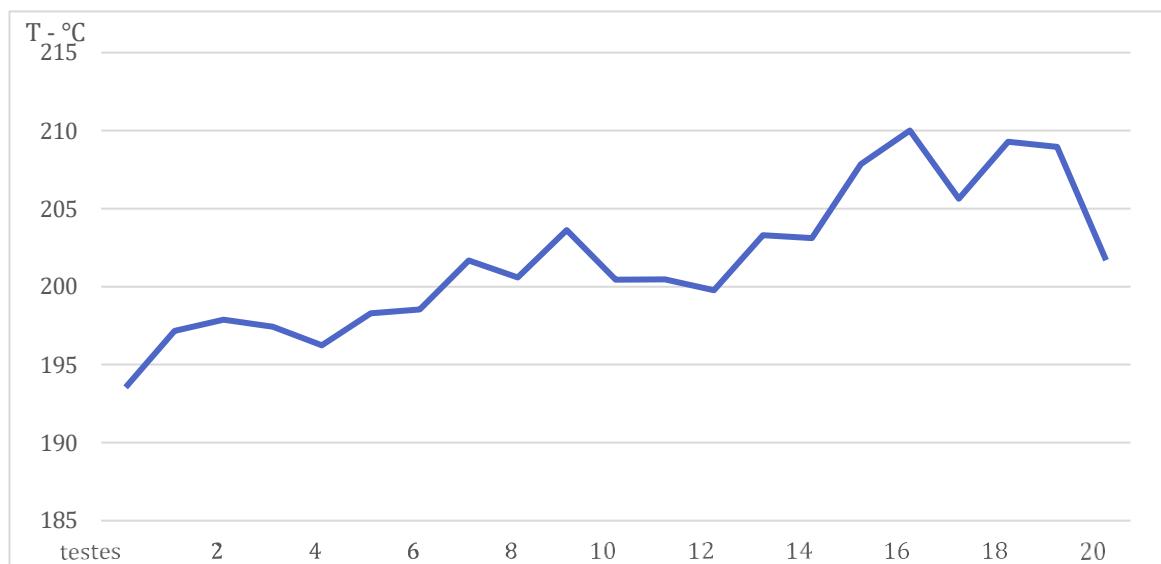


Figura 5.8 - Variação da Temperatura Máxima sem revestimento. Fonte: Autoria Própria.

5.2 Estimativa Inicial do Fluxo de Calor

Considerando a solução do problema direto, explicado no capítulo 3, item 3.2, foi possível obter uma ideia da ordem de valor do fluxo considerando as temperaturas experimentais, uma vez que o procedimento se baseou em aplicar valores randômicos de entrada para o fluxo de calor até se atingir a faixa de valores máximos médios para todos os testes com e sem revestimento.

Realizou-se uma estimativa inicial do fluxo de calor para a ferramenta revestida e sem revestimento utilizando o método do capítulo anterior. Desenvolveu-se uma programação na linguagem do MatLab, em interface com o COMSOL. O procedimento de estimativa, neste caso, buscou a obtenção de um fluxo de calor dentro de uma faixa de valores já obtidos da literatura e comparando-se algumas soluções do problema direto por verificação. Como mencionado, esta primeira estimativa considera um fluxo de calor constante durante o tempo de torneamento, e utiliza o teorema de Bayes.

O método consiste em se aplicar uma centena de valores aleatórios de fluxo de calor, variando dentro de uma certa faixa de valores de fluxo de calor (obtido da literatura) para as temperaturas do teste 1. Para cada variável aleatória de fluxo de calor, a respectiva temperatura teórica é calculada pelo modelo numérico e comparada a temperatura medida experimentalmente, conforme descrito no capítulo anterior. A Figura 5.9 apresenta o fluxo de calor estimado enquanto a Figura 5.10 uma comparação das temperaturas calculadas a partir deste fluxo estimado com as temperaturas experimentais obtidas para a posição do termopar 1.

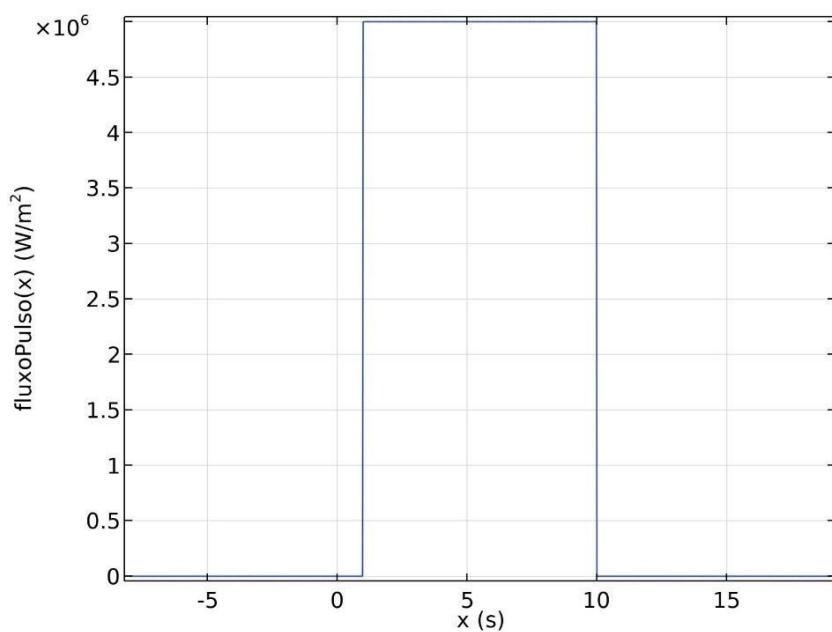


Figura 5.9 - Perfil de fluxo estimado para a ferramenta com revestimento. Fonte: Autoria Própria.

Com o perfil de fluxo exposto na figura 5.9, o valor máximo de fluxo de calor obtido foi de $5,349 \cdot 10^6$ W/m². Porém, observa-se na figura 5.10, que apesar do valor estimado ser semelhante ao valor obtido na solução numérica, apresentado no capítulo 3, o comportamento da temperatura simulada foi diferente do comportamento da temperatura experimental.

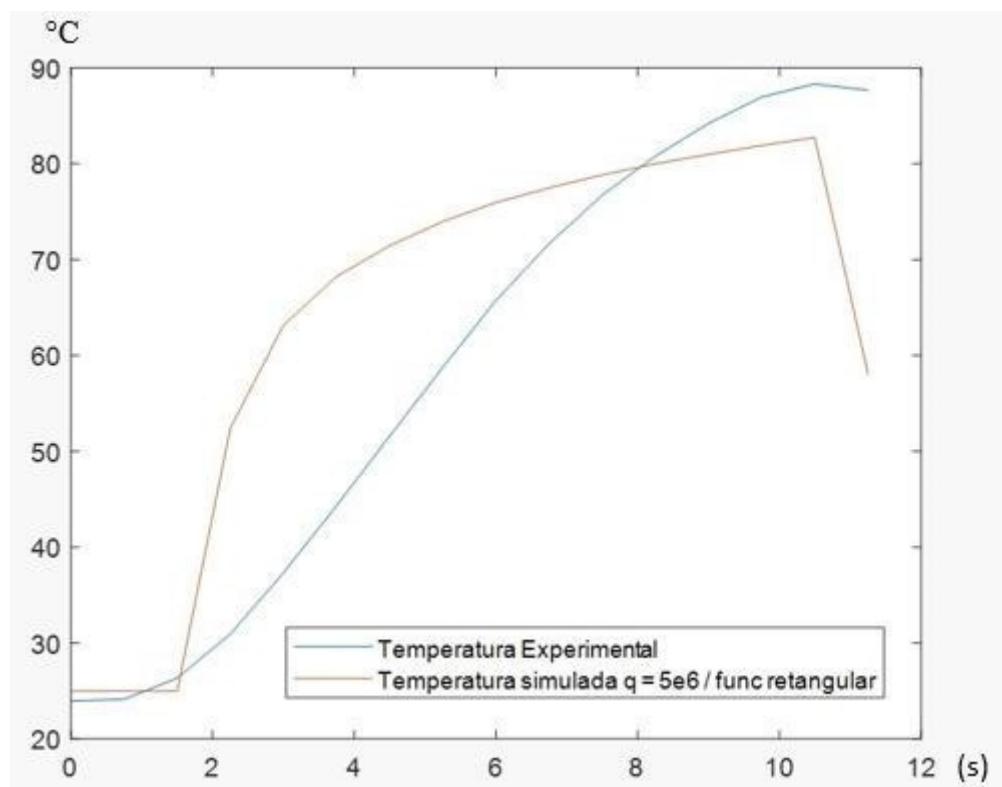


Figura 5.10 - Comparaçāo entre as temperaturas simuladas e experimentais na ferramenta revestida. Fonte: Autoria Própria.

Além da diferença de perfil, a máxima temperatura simulada foi menor quando comparada à temperatura máxima experimental. Essas divergências, indicam que o modelo aplicado para a solução inversa, utilizando um fluxo constante, está conflitante com o modelo utilizado para a solução direta, evidenciando que apesar do fluxo ser semelhante, ele não é constante e varia a cada passo de tempo da simulação, e que essa similaridade entre os valores de fluxo estimados pode ter sido forçada para satisfazer tal modelo.

Para as estimativas sem revestimento, utilizando o mesmo perfil de fluxo de calor de entrada das simulações com o revestimento, figura 5.9, houve uma proximidade com o valor do fluxo estimado no problema direto, com um valor aproximado de $1,35 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$. Em contrapartida às diferenças da solução inversa para o inserto revestido, os resultados sem revestimento se mostraram promissores. Uma vez que, além do valor do fluxo estimado, o comportamento da temperatura experimental e da temperatura simulada foram próximos, figura 5.11.

Porém, essa proximidade não é suficiente para aprovar tal modelo, reforçando a ideia de que o fluxo não é constante para esse tipo de problema e que as semelhanças de valores obtidas com as simulações podem ser forçosas.

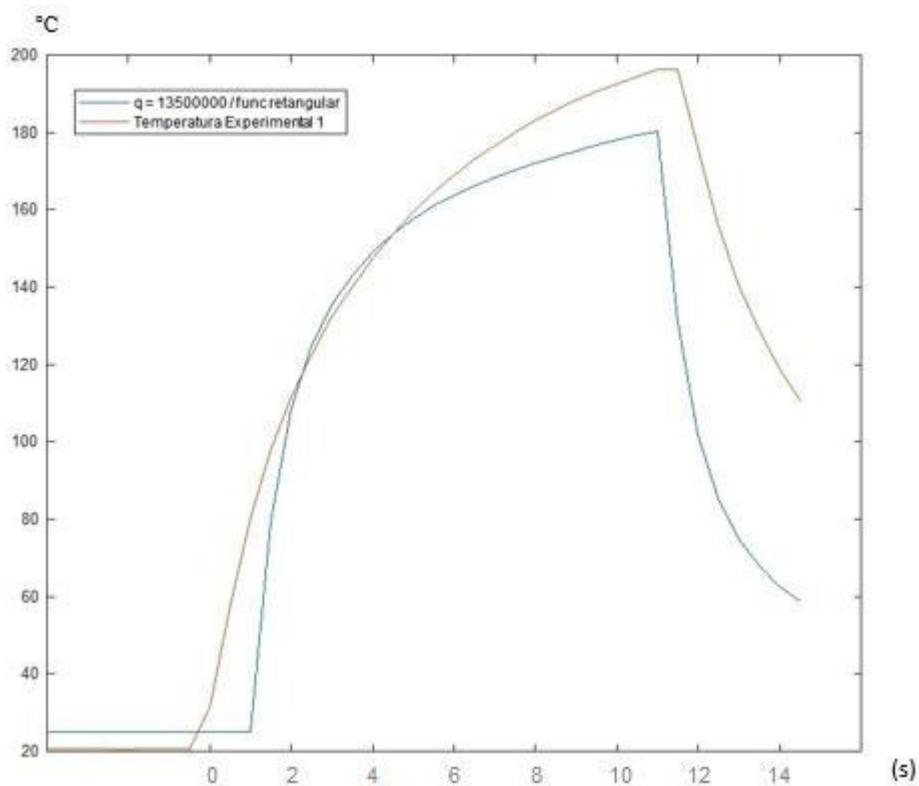


Figura 5.11 - Comparação entre as temperaturas simuladas e experimentais na ferramenta sem revestimento. Fonte: Autoria Própria.

Observa-se na Figura 5.11, que o comportamento da temperatura simulada e experimental foi semelhante, indicando que o modelo pode ser aplicável para a ferramenta sem revestimento e reforça que a diferença exposta entre os comportamentos das temperaturas nas Figuras 5.6 e 5.10 são devidas à presença do revestimento no inserto, influenciando nos mecanismos de desgaste da ferramenta. Entretanto, o modelo não se apresenta satisfatório para a estimativa, visto que para o mesmo valor de fluxo, a temperatura simulada foi menor que a temperatura máxima dos experimentos.

5.3 Estimativa Final do Fluxo considerando a sua Variação Temporal

A seção anterior evidenciou que os efeitos transitentes do processo de torneamento devem ser considerados. Claramente o fluxo de calor tem comportamento transitente e este comportamento deve ser considerado para a sua estimativa.

Assim, o mesmo procedimento de estimativa foi aplicado, porém considerando um processo de estimativa sequencial onde cada componente de fluxo de calor transitente estimado era representativo de um tempo, t_i , com um intervalo de $\Delta t = 0.75\text{s}$ para a ferramenta

com o revestimento e $\Delta t = 0,5\text{s}$ para a ferramenta sem o revestimento, sendo o fluxo considerado constante apenas para o respectivo intervalo.

Ou seja, uma vez obtido o fluxo de calor, q_i para um instante t_i , um novo processo era aplicado para o tempo $t_i + 1 = t_i + \Delta t$ e o novo fluxo de calor q_{i+1} era obtido, repetindo-se o processo para cada tempo.

Apresenta-se na Figura 5.12 o novo perfil de fluxo de calor para as simulações com revestimento, e a Figura 5.13, apresenta o comportamento da temperatura, ambos para o passo de 4 segundos.

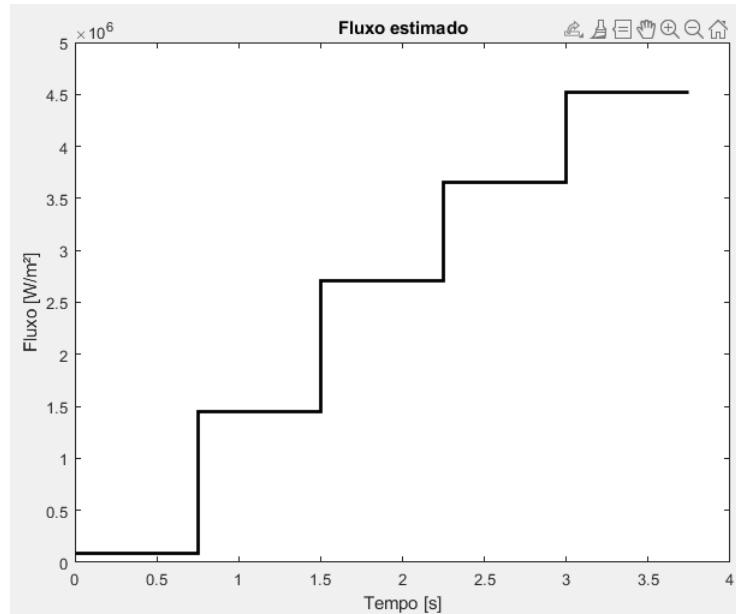


Figura 5.12 - Perfil do fluxo de calor estimado da ferramenta revestida no passo de 4 segundos. Fonte: Autoria Própria.

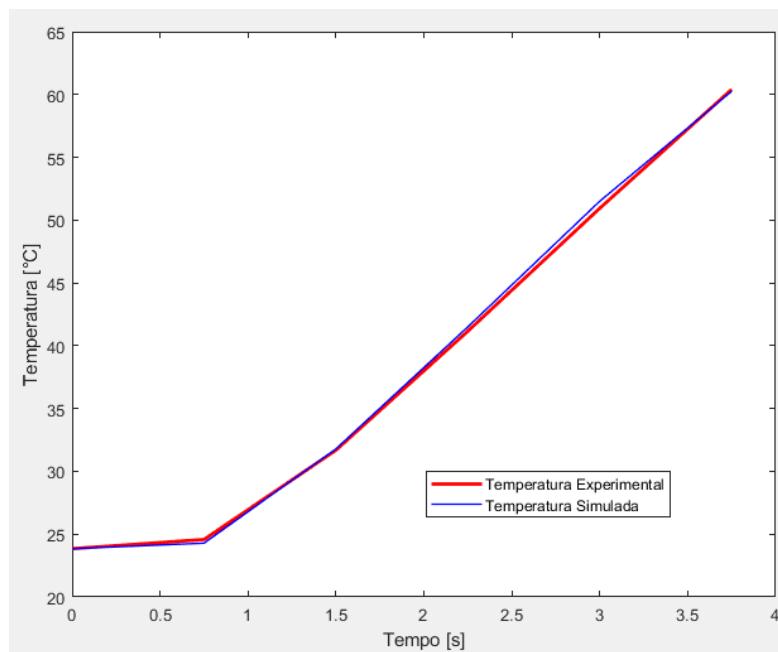


Figura 5.13 - Comportamento da temperatura da ferramenta revestida no passo de 4 segundos. Fonte: Autoria Própria.

Seguindo com a evolução do fluxo de calor, pode-se perceber que o modelo abrange melhor o perfil do fluxo de calor variável com o tempo e as Figuras 5.14 e 5.15 expõem essa evolução no passo de 8 segundos de simulação.

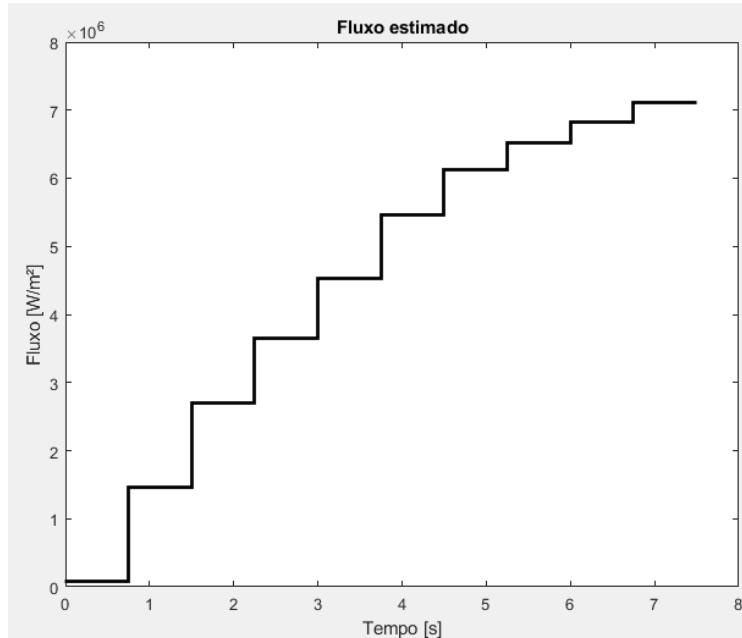


Figura 5.14 - Perfil do fluxo de calor estimado da ferramenta revestida no passo de 8 segundos. Fonte: Autoria Própria.

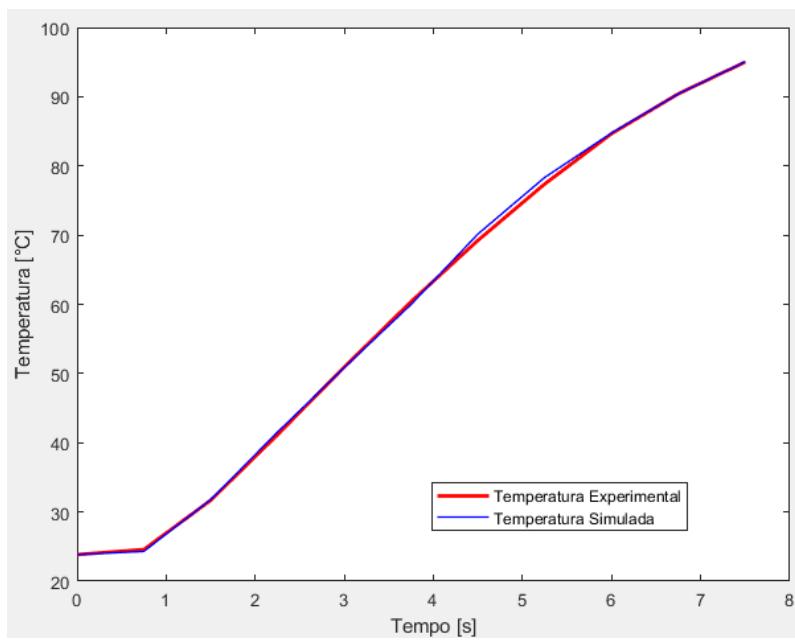


Figura 5.15 - Comportamento da temperatura da ferramenta revestida no passo de 8 segundos. Fonte: Autoria Própria.

Finalizando a simulação, as Figuras 5.16 e 5.17, apresentam o perfil do fluxo e o comportamento da temperatura para toda a estimativa.

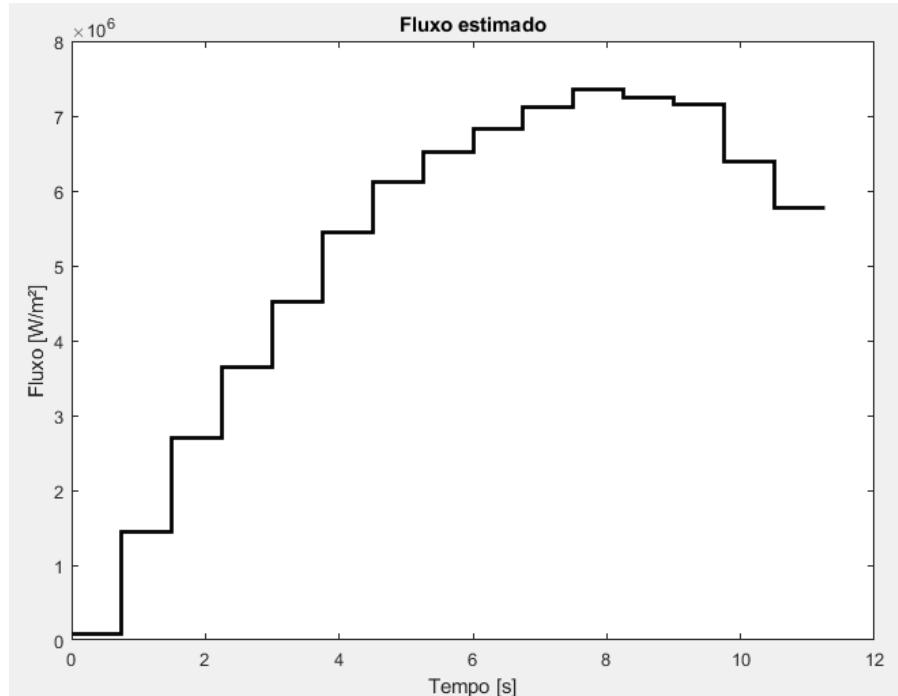


Figura 5.16 - Perfil do fluxo de calor estimado da ferramenta revestida no passo de 11,25 segundos. Fonte: Autoria Própria.

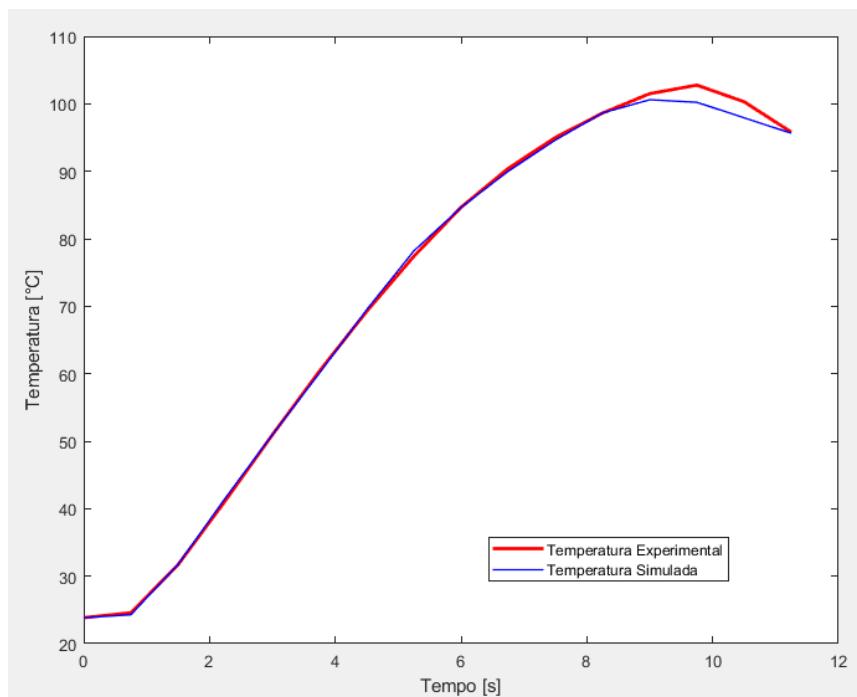


Figura 5.17 - Comportamento da temperatura da ferramenta revestida no passo de 11,25 segundos. Fonte: Autoria Própria.

O fluxo de calor se apresenta um comportamento crescente durante toda a simulação até alcançar a temperatura máxima simulada, depois decresce, como observado na Figura 5.17 e tabela 8. Seu ponto máximo é atingido no passo de tempo de 8 segundos, diferente da temperatura estimada que atinge seu auge próximo dos 9 segundos de simulação.

O comportamento da temperatura seguiu o mesmo proceder e correspondeu bem quando comparada à temperatura dos testes experimentais, porém na temperatura máxima experimental, houve uma leve discrepância entre as duas curvas. Fato este que não ocorre durante a simulação do passo de 10,5 segundos, como indica a Figura 5.18.

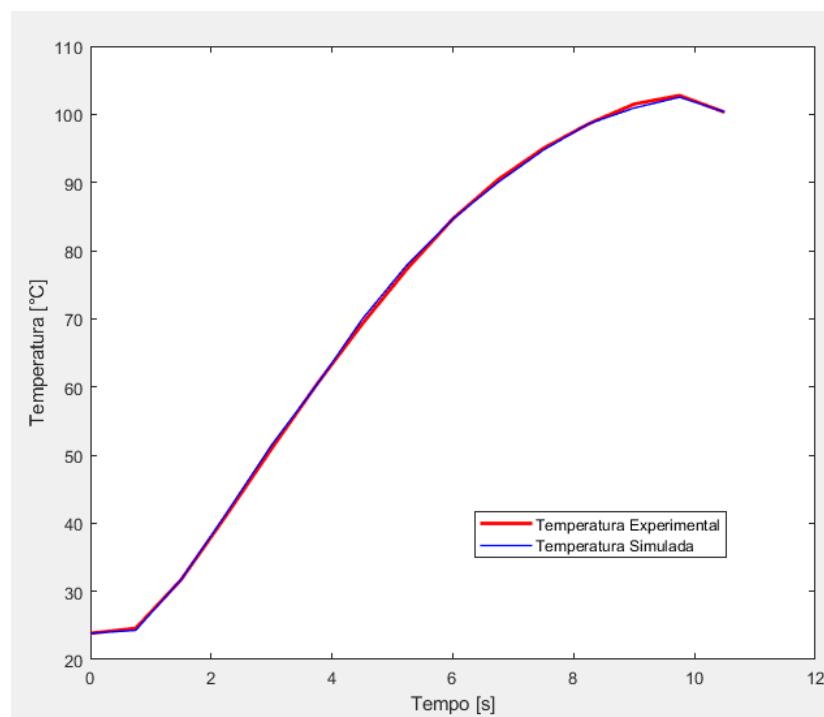


Figura 5.18 - Comportamento da temperatura da ferramenta revestida no passo de 10,5 segundos. Fonte: Autoria Própria.

Tabela 8 - Fluxos estimados para cada passo de tempo para a ferramenta revestida.

Tempo	Fluxo Estimado (W/m^2)	Fluxo Estimado (W/m^2)
0,75	833.145	8,3314E+05
1,5	1.454.196	1,4542E+06
2,25	2.707.398	2,7074E+06
3	3.653.200	3,6532E+06
3,75	4.524.191	4,5242E+06
4,5	5.454.171	5,4542E+06
5,25	6.122.057	6,1221E+06
6	6.524.191	6,5242E+06
6,75	6.824.502	6,8245E+06
7,5	7.112.316	7,1123E+06
8,25	7.358.500	7,3585E+06
9	7.240.940	7,2409E+06
9,75	7.153.097	7,1531E+06
10,5	6.382.708	6,3827E+06
11,25	5.765.021	5,7650E+06

Idealmente seria importante que todas as simulações fossem realizadas para cada teste experimental, num total de 40 testes, divididos entre a ferramenta com e sem revestimento. Porém, devido ao alto custo computacional da técnica inversa empregada neste trabalho, foi-se utilizado um desses testes e comparado com a média de todos eles, os resultados obtidos com esse teste em comparação com a média demonstram um bom padrão de resultados e um menor tempo de simulação requerido para mapear todo o comportamento do modelo.

Diante do uso dos dados experimentais do teste 1 para a estimativa do fluxo, em vez da temperatura média, torna-se importante comparar esses dois conjuntos de dados para validar todo o sistema, como ilustrado na Figura 5.19. Essa comparação indica que, apesar da utilização dos dados do teste 1, os resultados são semelhantes aos obtidos com a média dos experimentos, uma vez que as curvas apresentam comportamentos semelhantes. Ainda na Figura 5.19, é apresentada uma curva suavizada do teste 1, com um fator de redução desse valor de temperatura para aproximar-se da média. Já na Figura 5.20, é feita a comparação entre o fluxo estimado no teste 1 e o fluxo reduzido.

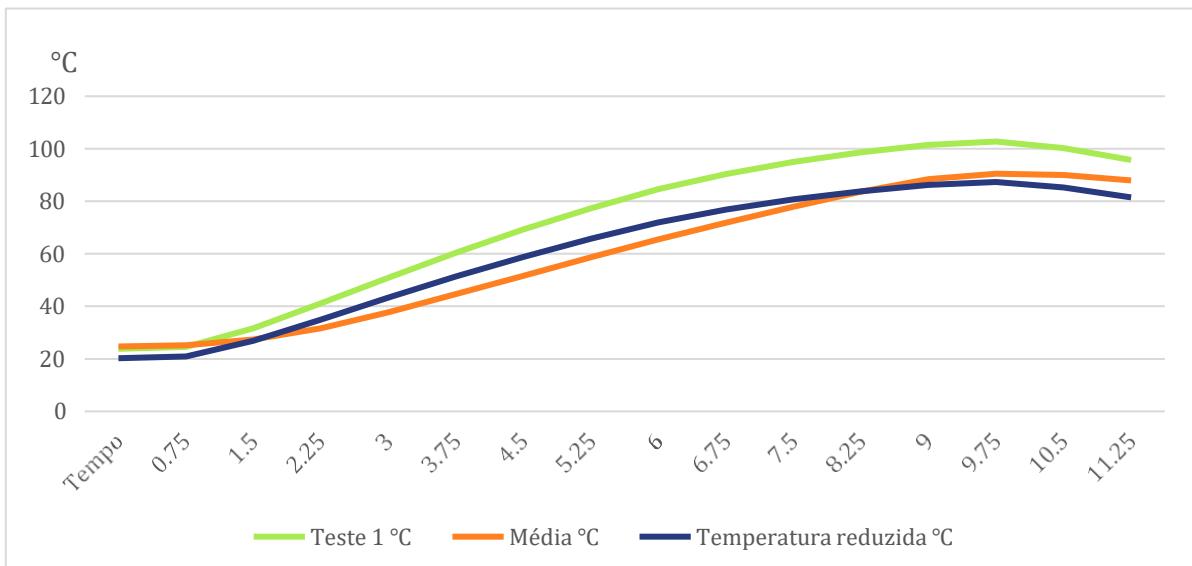


Figura 5.19 - Comparação do comportamento das temperaturas do teste 1, média e reduzida. Fonte: Autoria Própria.

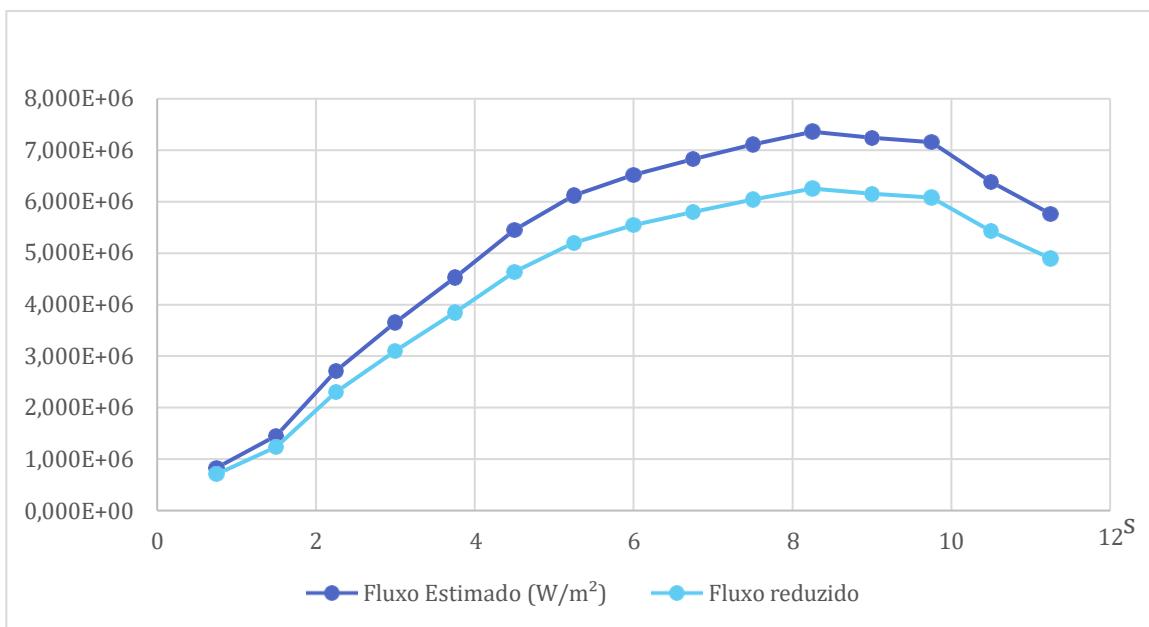


Figura 5.20 - Comparação do fluxo de calor das temperaturas do teste 1, média e reduzida. Fonte: Autoria Própria.

Para os testes sem revestimento todo o procedimento descrito anteriormente foi repetido com uma única diferença, o passo de tempo utilizado. Para estes testes, o custo computacional foi menor comparado aos testes com revestimento, o que possibilitou utilizar um intervalo de tempo menor, de 0,5 segundos para cada simulação.

Na Figura 5.21 está representada o novo perfil de fluxo de calor para as simulações sem revestimento, e a Figura 5.22, apresenta o comportamento da temperatura, ambos para o passo de 4 segundos.

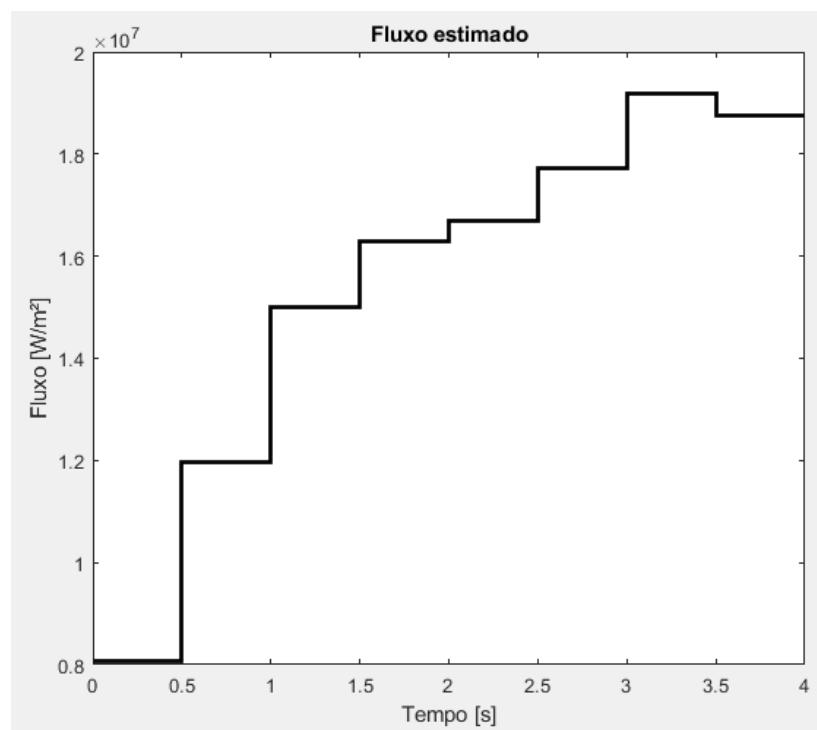


Figura 5.21 - Perfil do fluxo de calor estimado sem revestimento no passo de 4 segundos. Fonte: Autoria Própria.

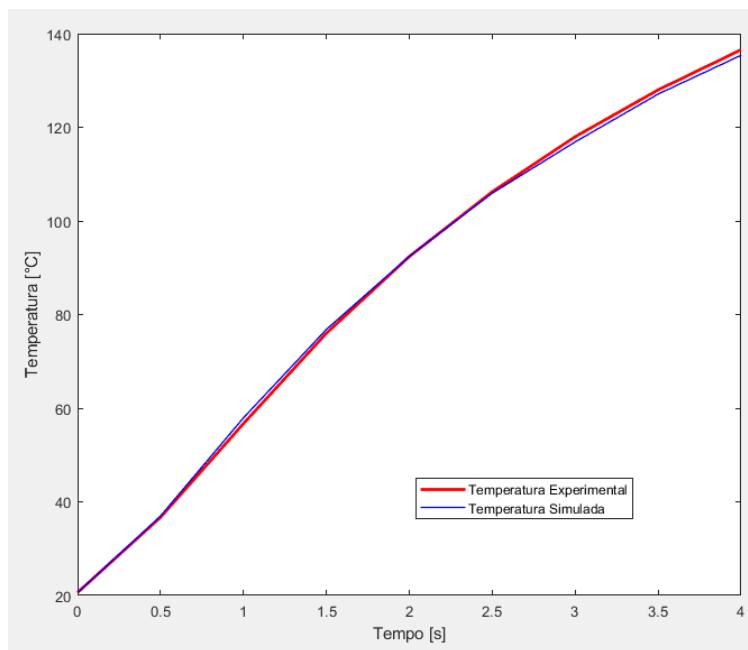


Figura 5.22 - Comportamento da temperatura sem revestimento no passo de 4 segundos. Fonte: Autoria Própria.

Acompanhando a evolução do fluxo de calor, pode se perceber que o modelo abrange melhor o perfil do fluxo de calor variável com o tempo e as Figuras 5.23 e 5.24 expõem essa evolução no passo de 8 segundos de simulação.

Demonstra-se nas Figuras 5.25 e 5.26 a estimativa final do fluxo e do comportamento da temperatura para o tempo total de 12 segundos, tabela 9. Percebe-se um fluxo de calor crescente no início da usinagem e uma oscilação a partir do quinto segundo de simulação até alcançar o seu ponto máximo entre o décimo e o décimo primeiro passo tempo, seguido de uma queda vertiginosa, fato este que ocorre também para a temperatura máxima simulada.

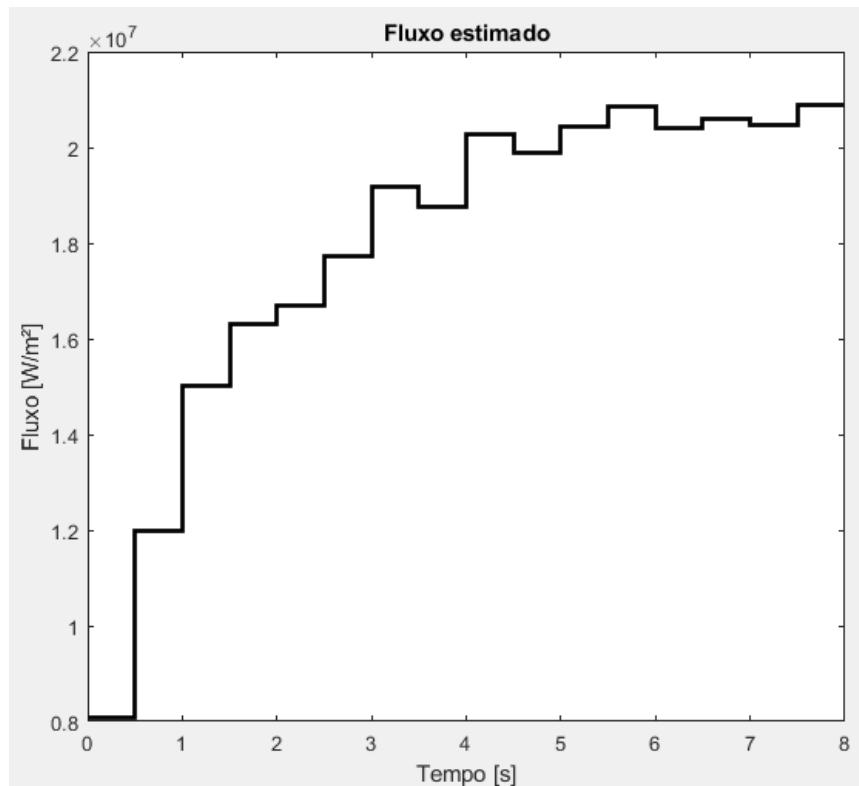


Figura 5.23 – Perfil do Fluxo de calor estimado sem revestimento no passo de 8 segundos. Fonte: Autoria Própria.

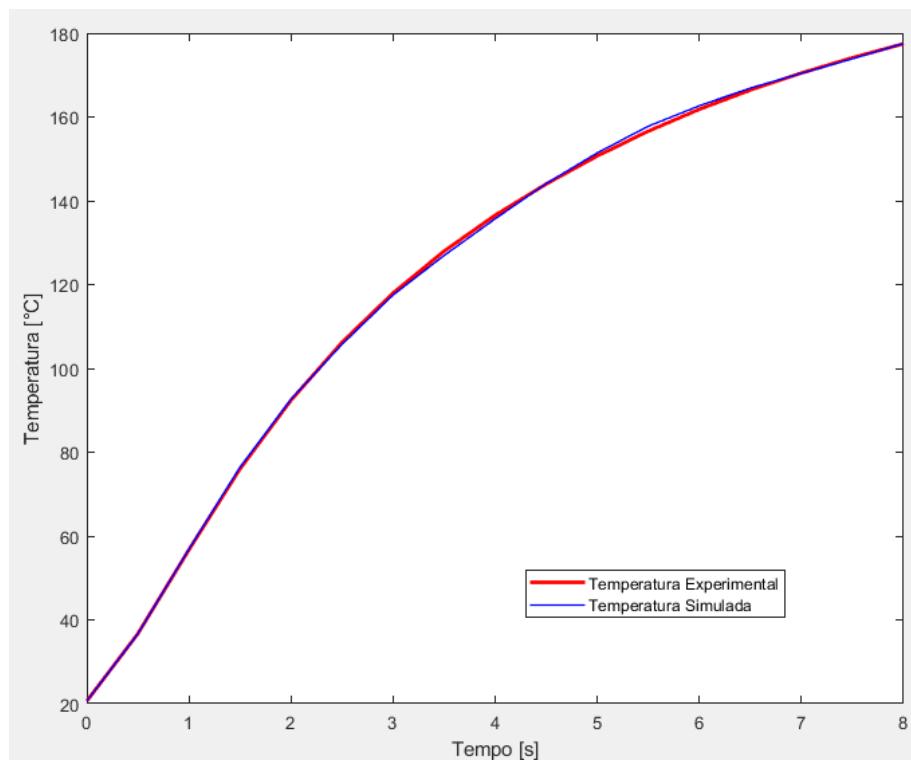


Figura 5.24 - Comportamento da temperatura sem revestimento no passo de 8 segundos. Fonte: Autoria Própria.

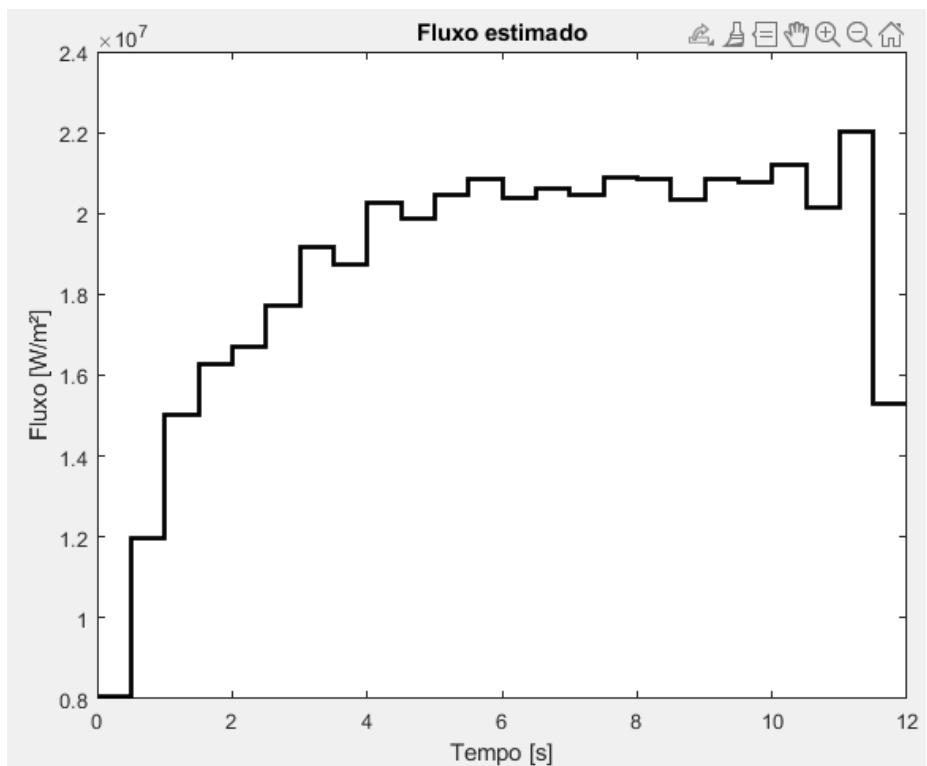


Figura 5.25 - Perfil do fluxo de calor estimado sem revestimento no passo de 12 segundos. Fonte: Autoria Própria.

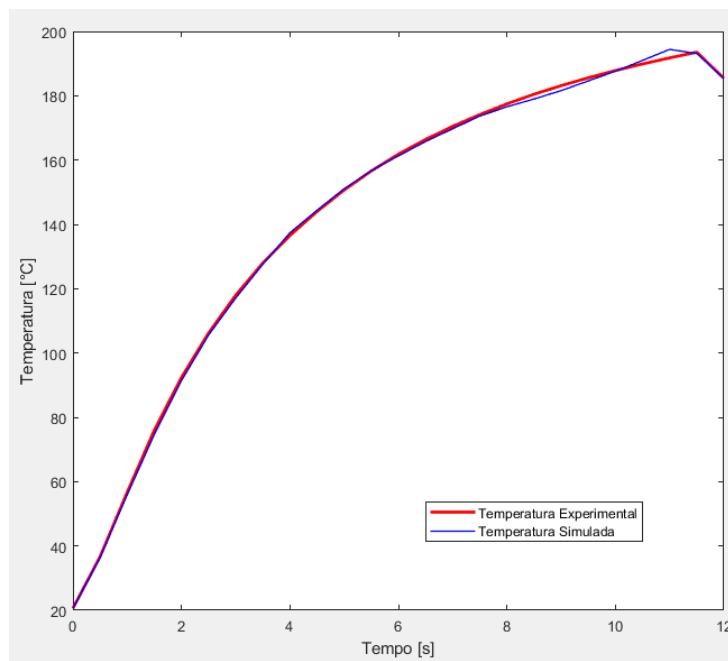


Figura 5.26 - Comportamento da temperatura sem revestimento no passo de 12 segundos. Fonte: Autoria Própria.

Tabela 9 - Fluxos estimados para cada passo de tempo para a ferramenta sem revestimento

Tempo	Fluxo Estimado (W/m^2)	Fluxo Estimado (W/m^2)
0,5	8071641,95	8,0716E+06
1	11970599,07	1,1971E+07
1,5	15006339,73	1,5006E+07
2	16291865,26	1,6292E+07
2,5	16696672,46	1,6697E+07
3	17729743,66	1,7730E+07
3,5	19179712,87	1,9180E+07
4	18747705,84	1,8748E+07
4,5	20275848,57	2,0276E+07
5	19875482,95	1,9875E+07
5,5	20444355,43	2,0444E+07
6	20844858,69	2,0845E+07
6,5	20391080,31	2,0391E+07
7	20603263	2,0603E+07
7,5	20459157,12	2,0459E+07
8	20878479,4	2,0878E+07
8,5	20854214,99	2,0854E+07
9	20359569,14	2,0360E+07
9,5	20854891,18	2,0855E+07
10	20775959,59	2,0776E+07
10,5	21201456,53	2,1201E+07
11	20136065,56	2,0136E+07
11,5	22026890,74	2,2027E+07
12	15304575,59	1,5305E+07

Assim como nos testes com revestimentos, é necessária a comparação entre o teste 1, usado para as estimativas sem revestimento, e a média de todos os experimentos. Nesse caso, a temperatura média é maior do que a do teste 1, mas as duas curvas apresentam o mesmo comportamento. Isso indica que os resultados obtidos com a média seguiriam a mesma tendência, sugerindo as mesmas conclusões. Além disso, sugere que o fluxo estimado seria menor do que o atual.

A partir destes resultados, percebe-se que os revestimentos exercem influência de natureza tribológica nas ferramentas de corte. Os autores, Rech, Battaglia e Moisan (2005) e Rech, Kusiak e Battaglia (2004) endossam os resultados aqui obtidos, afirmando que os revestimentos não protegem termicamente os insertos, mas que eles, como o TiN e o MoS₂, por exemplo, influenciam de maneira significativa no fluxo de calor transmitido à ferramenta de corte devido aos efeitos tribológicos quando comparados a uma ferramenta sem o revestimento. E que essas diferenças só podem ser atribuídas a variações do comportamento do desgaste do revestimento e do material da ferramenta.

A influência que os revestimentos têm na melhora dos fenômenos tribológicos estão na redução da adesão, pela redução da área de contato ferramenta-cavaco e da diminuição da espessura da zona de cisalhamento secundária. O fluxo de calor é dependente dessa área de contato e como ela é reduzida com os revestimentos, tanto a temperatura gerada, quanto o fluxo de calor tendem a ser menores do que os resultados da temperatura e fluxo de ferramentas sem revestimento.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou uma análise comparativa da influência térmica do revestimento de nitreto de titânio, TiN, e de sua ausência, em ferramentas de corte de metal duro (WC-Co) durante o processo de usinagem ortogonal de uma peça de ferro fundido cinzento, através da estimativa de fluxo de calor e da obtenção da temperatura na interface peça-ferramenta.

Realizou-se a modelagem tridimensional do conjunto ferramenta e suporte da ferramenta, onde as condições de contorno levadas em consideração foram representadas pela exposição da ferramenta à um meio convectivo exceto na interface peça-ferramenta onde parte do calor gerado flui para o inserto, além da resistência térmica presente no conjunto que apresentam geometria complexa e justificam o uso de uma abordagem numérica para a solução do problema térmico. Para a estimativa do fluxo de calor utilizou-se a Inferência Bayesiana e o Teorema de Bayes, técnicas bem difundidas para a solução de problemas inversos em condição de calor. Realizou-se, com base na solução direta, a estimativa do fluxo por meio de duas técnicas, com e sem variação dessa propriedade termofísica no tempo.

Para a obtenção da temperatura nos testes experimentais, realizou-se o torneamento do ferro fundido cinzento da ferramenta com e sem revestimento para posteriores comparações em um total de 40 testes, 20 com cada uma das duas condições da ferramenta. Os testes foram realizados com um intervalo de um dia para o não comprometimento dos resultados devido à inércia térmica. Verificou-se através dos dados obtidos experimentalmente que a ferramenta sem revestimento apresentou o comportamento esperado, gerando maiores temperaturas na interface de contato peça-ferramenta, cerca de 110°C de diferença quando comparada às temperaturas geradas no inserto revestido.

Para a estimativa do fluxo de calor utilizando a inferência bayesiana realizou-se 100 simulações para cada passo de tempo de cada temperatura obtida experimentalmente e cada uma desses ensaios considerava o fluxo aleatório. Para a condição sem revestimento utilizou-se um passo de tempo de 0,5 segundos para essa análise, enquanto para a condição revestida um passo de tempo de 0,75 segundos, com um tempo total de 12 segundos, essa diferença foi necessária por causa do maior custo computacional da técnica usada.

Para a estimativa do fluxo de calor constante com o tempo, verificou-se a inefetividade desta hipótese indicando que o fluxo de calor de entrada varia com o tempo de usinagem, não podendo ser considerado permanente. Logo, as simulações para a segunda técnica, com o fluxo de calor variável se mostraram adequadas e efetivas para o modelo térmico em questão.

Os valores de fluxo obtidos são crescentes a cada passo de tempo até alcançar o valor máximo da simulação e depois decrescem, assim como acontece com a temperatura experimental obtida durante a usinagem. E os dados que reforçam essa ideia são as temperaturas simuladas quando comparadas aos as temperaturas experimentais que apresentam o mesmo comportamento.

Ainda para a estimativa do fluxo de calor variável com tempo, verificou-se a influência do revestimento sobre o modelo, uma vez que os valores obtidos de fluxo para as duas condições de teste seguiram a mesma tendência das temperaturas experimentais, com o fluxo obtido para ferramenta revestida consideravelmente inferior ao inserto sem o revestimento.

Como contribuição deste trabalho, destaca-se a análise da influência de natureza tribológica do revestimento em ferramentas de corte, indicando que o revestimento não age de maneira a criar uma barreira térmica que limita a temperatura e fluxos gerado no contato ferramenta-cavaco, mas sim que esse fenômeno ocorre devido a limitação na área de contato imposta pelos revestimentos e consequente redução das propriedades termofísicas.

6.1 Perspectivas Futuras

De acordo com a pesquisa aqui desenvolvida, sugere-se as seguintes temáticas para trabalhos futuros:

- Adequar o aparato experimental para ferramentas de menores dimensões e analisar o efeito do revestimento;
- Ampliar a análise comparando com uma maior quantidade de revestimentos;
- Ampliar a discussão para processos de fresamento e furação (comparando os efeitos do revestimento em fresas e brocas);
- Analisar a influência do revestimento estimando o fluxo de calor e outras propriedades termofísicas através de outras técnicas de problemas inversos;
- Repetir o aparato experimental e adaptá-lo a um tempo de usinagem superior.

REFERÊNCIAS

- ADAMCZYK, W. P.; KRUCZEK, T.; MOSKAL, G.; BIAŁECKI, R. A. **Nondestructive technique of measuring heat conductivity of thermal barrier coatings**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 111, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.126>
- BADISCH, E.; FONTALVO, G.A.; STOIBER, M. et al. “**Tribological behavior of PACVD TiN coatings in the temperature range up to 500°C**”, Surface and Coatings Technology v. 163-164, pp. 585-590, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00626-6](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00626-6)
- BAE, Y. W.; LEE, W. Y.; BESMANN, T. M. et al. **Preparation and friction characteristics of self-lubricating TiN-MoS₂ composite coatings**. Materials Science and Engineering v. 209 pp. 372-376, 1996. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)10149-7](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)10149-7)
- BALZERS. Soluções de revestimento. <https://www.oerlikon.com/balzers/br/pt/br/portfolio/solucoes-de-superficie-balzers/soluoes-de-revestimentos-a-base-de-pvd-e-pacvd-da-oerlikon-balzers/>. Acesso em: 7 de outubro de 2022.
- BECK, J. V.; BLACKWELL, B.; CLAIR, CRSt. **Inverse Heat Conduction: Ill-Posed Problems**. New-York: A Wiley-Interscience publication, 1985.
- BERZEGAR, Z.; OZLU, E. **Analytical prediction of cutting tool temperature distribution in orthogonal cutting including third deformation zone**. Journal of Manufacturing Processes, v.67, p. 325-344, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.003>
- BLAU, P. J. **Elevated-temperature tribology of metallic materials**. Tribology International v. 43 pp. 1203-1208, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.01.003>
- BLUM, J. MARQUARDT, W. **An optimal solution to inverse heat conduction problems based on frequency-domain interpretation and observers**. Numerical heat transfer. Part B, fundamentals, v 32, n. 4, p. 453-478, 1997. <https://doi.org/10.1080/10407799708915019>
- BORCHARDT, I. G., GOMES, A. F. **Termometria Termoelétrica – Termopares**. Ed. Sagra S/A, Porto Alegre, 1979.
- CARVALHO, D.S.; ABRÃO, A.M.; RUBIO, J.C.C. Monitoramento da temperatura de usinagem. **XI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica**, Nova Friburgo, 2004.
- CARVALHO, S. R. **Determinação do campo de temperatura em ferramentas de corte durante um processo de usinagem por torneamento**. 2005. 151 f. Doutorado em engenharia mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, MG.
- CARVALHO, S.R.; ONG, T.H.; GUIMARÃES, G. **A mathematical and computacional model of furnaces for continuous steel strip processing**. Journal of Materials Processing Technology, v. 178, n. 1-3, p. 379-387, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.083>
- COLAÇO, M.J.; ORLANDE, H.R.B; DULIKRAVICH, G.S. **Inverse and optimization problemas in heat transfer**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v.28, .1, p. 1-24, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782006000100001>

COSTA, I.S.; JÚNIOR, M.B.; SILVA, M.B. **Medição de calor e temperatura em usinagem por meio do método calorimétrico.** Acta Mechanica et Mobilitatem, 2018. <https://doi.org/10.22533/at.ed.48719050415>

COSTA, I.S., SILVA, M.B., **Medição de temperatura de usinagem em aços de corte fácil através do método do termopar ferramenta-peça.** Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2015.

DAVID, J.P.C. et al. **Usando o planejamento de experimentos para a predição da temperatura de usinagem através da técnica do termopar acoplado à ferramenta de corte.** Brazilian Journal of Development, 48587-48608 (2022). <https://doi.org/10.34117/bjdv8n6-390>

DE SOUSA, J. A. G.; SALES, W. F.; MACHADO, A. R. **A review on the machining of cast irons.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 94, n. 9–12, p. 4073– 4092, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1140-1>

DORR J.; et al. **In Situ Temperature Measurement to Determine the Machining Potencial of Diferrent Tool Coatings.** Surface and Coatings Technology, Vol. 174-175, pp. 389-392. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(03\)00708-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00708-4)

DU, A.; WAN, C.; QU, Z.; WU, R.; PAN, W. **Effects of Texture on the Thermal Conductivity of the LaPO₄ Monazite.** Journal of the American Ceramic Society, v. 93, p. 2822-2827, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.03779.x>

FERNANDES, Ana Paula. **An analytic heat transfer function method to solve an inverse heat conduction problems.** 2013. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

FERNANDES, A. P.; DOS SANTOS, M. B.; GUIMARÃES, G. **An analytical transfer function method to solve inverse heat conduction problems.** Applied Mathematical Modelling, v. 39, n. 22, p. 6897–6914, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.02.012>

FERRARESI, D.: **Fundamentos da usinagem dos metais.** São Paulo: Blucher, 1970.

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

FRANÇA, Pedro Henrique Pires. **Estudo da Temperatura em Ferramentas de Usinagem com Canais de Refrigeração Internos no Torneamento do Ferro Fundido Cinzento.** 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

GOMES, R. J. N. **Efeito da temperatura na resistência ao desgaste de ligas a base de cobalto.** Dissertação de M.Sc., UFPR, Curitiba, PR, Brasil, 2012.

GNANASEKARAN, N.; BALAJI, C. **A Bayesian approach for the simultaneous estimation of surface heat transfer coefficient and thermal conductivity from steady state experiments on fins.** International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 54, n. 13–14, p. 3060–3068, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.01.028>

GRZESIK, W. **Experimental investigation of the cutting temperature when turning with coated Index able inserts.** Int. J. Mach. Tools Manuf. 39, 355–369, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(98\)00044-3](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(98)00044-3)

GRZESIK W.; NIESLONY P. **Physics based modelling of interface temperatures in machining with multilayer coated tools at moderate cutting speeds.** Int J Mach Tools Manuf, v. 44(9), p. 889–901, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.02.014>

JAKKAREDDY, P. S.; BALAJI, C. **Estimation of local heat transfer coefficient from natural convection experiments using liquid crystal thermography and Bayesian method.** Experimental Thermal and Fluid Science, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.04.026>

KAIPPIO, J. P.; SOMERSALO, E. **Computational and Statistical Methods for Inverse Problems.** New York: Springer, 2004.

KAMINISE, A.; GUIMARAES, G.; SILVA, M. B. **Development of a tool-work thermocouple calibration system with physical compensation to study the influence of tool-holder material on cutting temperature in machining.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 73. 735- 747, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5898-0>

KEANINI, R. G.; LING, X.; CHERUKURI, H. P. **A modified sequential function specification finite element-based method for parabolic inverse heat conduction problems.** Computacional Mechanics, v. 36, n. 2, p. 117-128, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00466-004-0644-3>

KÖNIG, W. Fertigungsverfahren: Drehen, Fraesen, Bohren. **Duesseldorf.** VDI-Verlag, Band 1, 1990.

KUS, A.; et. al. **Thermocouple and Infrared Sensor-Based Measurement of Temperature Distribution in Metal Cutting.** Sensors 2015. <https://doi.org/10.3390/s150101274>

LIMA, Frederico Romagnoli da Silveira. **Modelagem tridimensional de problemas inversos em condução de calor:** aplicação em processos de usinagem. 2001. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.

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

LIAN, Y. et al. **Preparation of tungsten disulfide (WS₂) soft-coated nano-textured selflubricating tool and its cutting performance.** Int J Adv Manuf Technol, v. 68, p. 2033–2042, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4827-y>

LIANG, L.; XU, H.; KE, Z. **An improved three-dimensional inverse heat conduction procedure to determine the tool-chip interface temperature in dry turning.** International Journal of Thermal Sciences, v. 64, p. 152-161, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.08.012>

LOULOU, T.; SCOTT, E.P. **Estimation of 3-dimensional heat flux from surface temperature measurements using an interative regularization method.** Heat and Mass transfer, v.39, p.435-443, 2003. <https://doi.org/10.1007/s00231-002-0297-8>

MACHADO, A. R; SILVA, M.B. **Usinagem dos Metais.** Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

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

MARCONDES, F. C. A **História do Metal Duro**. 1ºEdição. Sandvik do Brasil S/A., março, 1990.

MARTAN, J. E, BENES. **Thermal Properties of Cutting Tool Coatings at High Temperatures**. *Thermochimica Acta*, Vol. 539, pp. 51-55, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.03.029>

MELO, A.C.A. **Estimação da temperatura de corte utilizando problemas inversos em condução de calor**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia, 1998.

MIRANZO, P.; et. al. **Thermal conductivity enhancement in cutting tools by chemical vapor deposition diamond coating**. *Diamond and Related Materials*, p. 703-707.
[https://doi.org/10.1016/S0925-9635\(02\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(02)00028-6)

NAVES, V.T.G.; LUIZ, N.E.; MACHADO, A.R.; DANTAS, N.O. **Calibração de um sistema termopar ferramenta-peça par medição de temperatura de usinagem**. 16º Simpósio de pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2006.

OLIVEIRA, G. C.; FERNANDES, A. P.; GUIMARÃES, G. **Thermal behavior analysis of coated cutting tool using analytical solutions**. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 39(8), p. 3249–3255, 2017.
<https://doi.org/10.1007/s40430-017-0848-z>

OZISIK, M. N; ORLANDE, H. R. B. **Inverse Heat Transfer: Fundamentals and Applications**, New York: Taylor & Francis, 2000.

PAGOTTO, C. R. **Estudo comparativo entre a medição de temperatura no torneamento convencional a seco por imagem termográfica e o modelo analítico de Trigger e Chao**. *Brazilian Journal of Development*, 2023. <https://doi.org/10.34117/bjdv9n1-239>

POLCAR, T.; KUBART, T.; NOVAK, R. et al. **Comparison of tribological behavior of TiN, TiCN and CrN at elevated temperatures**. *Surface & Coatings Technology* v. 193, pp. 192-199, Sept. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.07.098>

RECH, J.; BATTAGLIA, J.; MOISAN, A. Mater. **Process. Tech.** 159 (2005).
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.414>

RECH, J.; BATTAGLIA, J.; MOISAN, A. **Thermal influence of cutting tool coatings**. Mater Process Technol, v. 159(1), p.119–124, 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.414>

RECH, J.; KUSIAK, A.; BATTAGLIA, J., Surf. Coat. Technol. 186 (2004)
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.11.027>

REZENDE, A. P. **Modelagem analítica da temperatura de corte no torneamento do ferro fundido vermicular utilizando insertos de metal duro revestidos experimentalmente pelo processo SOL-GEL**. 2020. 176 f. Doutorado em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

SAMANI, M. K.; DING, X. Z.; KHOSRAVIAN, N.; AMIN-AHMADI, B.; YI, Y.; CHEN, G.; NEYTS, E. C.; BOGAERTS, A.; TAY, B. K. **Thermal conductivity of titanium nitride/titanium aluminum nitride multilayer coatings deposited by lateral rotating cathode arc**. Thin Solid Films, v. 578, p. 133–138, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.02.032>

SANTOS JUNIOR, José Aguiar. **Estimativa simultânea de propriedades térmicas usando uma superfície de aquecimento ativa e inferência Bayesiana: aplicação em superfícies revestidas e texturizadas.** 2022. 125 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

SANTOS JUNIOR, J. A.; FERREIRA OLIVEIRA, J. R.; DO NASCIMENTO, J. G.; FERNANDES, A. P.; GUIMARAES, G. **Simultaneous estimation of thermal properties via measurements using one active heating surface and Bayesian inference.** International Journal of Thermal Sciences, v. 172, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107304>

SERRA, E. C. **Influência da Temperatura e do Teor de Wsx no Comportamento Tribológico e de Oxidação em Filmes Finos de Tin+Wsx Depositados por Magnetron Sputtering Reativo.** 2019. 124 f. Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais. Universidade Federal do Sergipe.

SILVA, M. D. **Desenvolvimento e Construção de um Calorímetro para o Processo de Furação.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia, 2015, 90 p.

SOUSA, P.F.B. **Desenvolvimento de uma Técnica baseada em Funções de Green e Observadores Dinâmicos para Aplicação em Problemas Inversos.** 89 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

SOUSA, P. F. B. **Estudos de processos térmicos decorrentes da usinagem:** aplicação de problemas inversos em furação. 2009. 176 f. Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.

SOUSA, P.F.B.; CARVALHO, S.R.; GUIMARÃES, G. **Dynamic observers based on green's functions applied to 3d inverse thermal models Inverse Problems in Science and Engineering**, v.16, n.6, p.743-761, 2008. <https://doi.org/10.1080/17415970802082765>

STOLZ, G. **Numerical solutions to an inverse problem of heat conduction for simple shapes.** Journal of Heat Transfer, v.82, p. 20-26, 1960. <https://doi.org/10.1115/1.3679871>

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte.** 2a Edição, Florianópolis, 1989.

TABAK, D., MOURA, R.R., SILVA, M.B. **Temperatura de usinagem no torneamento da liga ti-6al-4v com o uso de lubrificantes sólidos.** XVIII Colóquio de Usinagem, 2014.

TOIVANEN, J. M. et al. **Simultaneous estimation of spatially distributed thermal conductivity, heat capacity and surface heat transfer coefficient in thermal tomography.** International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 55, n. 25–26, p. 7958–7968, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.08.024>

TRENT, E. M. Metal Cutting, 2nd Edition, Butterworths, London, ISBN, 0408108568, 245 p.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting.** 4. Ed. Boston, USA, Butterworth-Heinemann, 446p., 2000. <https://doi.org/10.1016/B978-075067069-2/50007-3>

TROJANOVÁ, Z.; HALMEŠOVÁ, K.; DROZD, Z.; ŠÍMA, V.; LUKÁČ, P.; DŽUGAN, J.; MINÁRIK, P. **Thermal Conductivity of an AZ31 Sheet after Accumulative Roll Bonding.** Crystals, v. 8, 2018. <https://doi.org/10.3390/crust8070278>

VANDERPLAATS, G.N. **Numerical Optimization Techniques for Engineering Design.** New York, NY: Megraw-Hill College, 1984.

VOEVODIN, A. A.; MURATORE, C.; AOUADI, S. M. **Hard coatings with high temperature adaptive lubrication and contact thermal management: review.** Surface & Coatings Technology v. 257, pp. 247-265, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.04.046>

VORNBERGER, A; PÖTSCHKE, J.; GESTRICH, T.; HERRMANN, M.; MICHAELIS, A. **Influence of microstructure on hardness and thermal conductivity of hardmetals.** International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, v. 88, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2019.105170>

ZEILMANN, R. P. **Análise do comportamento de ferramentas de metal duro K10 revestidas com nitreto de titânio pelo processo físico de deposição por vapor no ensaio de torneamento.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

ZHU, X. W.; SAKKA, Y.; ZHOU, Y.; HIRAO, K.; ITATANI, K. **A strategy for fabricating textured silicon nitride with enhanced thermal conductivity.** Journal of the European Ceramic Society, v. 34(10), p. 2585–2589, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.01.025>