

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Matheus de Oliveira Moreira

**METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE
TEMPERATURA DURANTE O FRÉSAMENTO
DE METAIS UTILIZANDO TERMOGRAFIA
DIRECIONAL ESPECTRAL**

Belo Horizonte, MG
2021

Matheus de Oliveira Moreira

METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DURANTE O FRESAMENTO DE METAIS UTILIZANDO TERMOGRAFIA DIRECIONAL ESPECTRAL

Versão final

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Energia e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Matheus Pereira Porto

Belo Horizonte, MG

2021

M838m

Moreira, Matheus de Oliveira.

Metodologia para medição de temperatura durante o fresamento de metais utilizando termografia direcional espectral [recurso eletrônico] / Matheus de Oliveira Moreira. - 2021.

1 recurso online (73 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Matheus Pereira Porto.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 72-73.

Apêndices: f. 62-71.

Bibliografia: f. 57- 61.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Espectro infravermelho - Teses. 3. Fresagem (Trabalhos em metal) – Teses. 4. Radiação – Teses. 5. Termografia – Teses. 6. Termômetro e termometria – Teses. I. Porto, Matheus Pereira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621 (043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DURANTE O FRESAMENTO DE METAIS UTILIZANDO TERMOGRAFIA DIRECIONAL ESPECTRAL"

MATHEUS DE OLIVEIRA MOREIRA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Matheus Pereira Porto (Orientador-Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Marcio Fonte Boa Cortez (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Pedro Bastos Costa (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Rafael Augusto Magalhães Ferreira (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Alexandre Mendes Abrão (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **"Mestre em Engenharia Mecânica"**, na área de concentração de **"Energia e Sustentabilidade"**.

Dissertação aprovada no dia 02 de março de 2021.

Por:



Documento assinado eletronicamente por **Matheus Pereira Porto, Servidor(a)**, em 08/03/2021, às 21:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Augusto Magalhães Ferreira, Professor do Magistério Superior**, em 10/03/2021, às 16:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Documento assinado eletronicamente por **Marcio Fonte Boa Cortez, Professor do Magistério Superior**, em 10/03/2021, às 19:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Mendes Abrao, Professor do Magistério Superior**, em 11/03/2021, às 16:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Bastos Costa, Professor do Magistério Superior**, em 12/03/2021, às 19:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0600127** e o código CRC **CA97A4D3**.

Dedico este trabalho ao meu pai (in memoriam), minha mãe e toda a minha família.

Agradecimentos

A Deus, pelo dom da vida. Esta conquista evidencia, mais uma vez, que o Senhor ilumina meus passos diariamente.

A minha família, por ser meu alicerce. Obrigado por me lembrar de que, na companhia adequada, a felicidade pode ser encontrada nos momentos mais banais do nosso dia a dia, tal como em uma boa conversa barulhenta tomada ao redor de uma mesa e acompanhada de um bom café. A minha mãe, por acreditar em mim e me motivar a buscar meus sonhos. Obrigado por todas as palavras de carinho que me disse, seja pessoalmente, seja por telefone. Essa conquista é, também, sua. Ao meu pai, por ter se doado para que eu tivesse uma boa educação. Seu filho conclui mais uma etapa. Saudades.

Ao meu orientador, Professor Matheus Porto, pela oportunidade e pelo suporte que me foi fundamental do início ao final da execução deste trabalho. Ao Professor Rafael Ferreira, pela disponibilidade em responder meus questionamentos. Ao Professor Alexandre Abrão e ao Laboratório de Usinagem e Automação, pela parceria durante a realização da pesquisa. Ao Laboratório de Biocombustíveis e ao Laboratório de Análises Químicas, pela disponibilização de equipamento e espaço para a realização de testes.

Aos meus colegas do Laboratório de Termometria (LabTerm), pela companhia, in loco durante 2019 e virtual em 2020. Obrigado pela recepção, pelos conselhos, pelo auxílio, pelas dicas e pelas risadas. Vocês trouxeram mais leveza para a trajetória.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos durante os vinte e quatro meses de mestrado. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC) da Escola de Engenharia da UFMG, por fornecer apoio aos seus alunos e viabilizar uma atmosfera de estímulo à pesquisa. À Escola de Engenharia e à Universidade Federal de Minas Gerais, instituições públicas e de excelência das quais tive o prazer e o privilégio de usufruir.

Resumo

O monitoramento da temperatura apresenta-se como uma maneira de entender e controlar o processo de corte de metais. Para a operação de fresamento de materiais metálicos, o uso de medidores de temperatura baseados na radiação emitida pelos corpos no espectro infravermelho apresenta vantagens como menor tempo de resposta e a possibilidade de monitorar perfis de temperatura. Todavia, os modelos embutidos nos softwares dos termovisores comerciais apresentam significativas simplificações, principalmente pela adoção do modelo de superfície difusa e cinza. A literatura científica demonstra que a emissividade de superfícies metálicas apresenta significativa dependência em relação à temperatura, ao espectro e à direção. Apesar disso, estudos científicos acerca do monitoramento de temperatura durante a usinagem de materiais metálicos normalmente negligenciam tais efeitos. Neste trabalho, um procedimento para estimar a temperatura de superfícies metálicas durante o processo de fresamento frontal utilizando termovisores é proposto. Tal procedimento envolve uma etapa de medição da emissividade da superfície metálica, com o intuito de captar a sua dependência em relação à temperatura, ao espectro e à direcionalidade. Para tanto, um aparato experimental é utilizado para medir grandezas que atuam como variáveis de entrada em uma rotina de pós-processamento, a qual se baseia em uma modelagem matemática que envolve equações de transferência de calor por radiação espectral e direcional. Utilizando o aço AISI H13 como corpo de prova durante os testes, obteve-se a emissividade entre 0,12 e 0,20 na banda espectral de $7,5 \mu m$ a $13 \mu m$ e no intervalo de temperatura de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ a $250 \text{ }^\circ\text{C}$. A temperatura da peça durante o fresamento frontal foi estimada para doze condições de corte diferentes e os valores obtidos foram de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ a $188 \text{ }^\circ\text{C}$. Tais resultados foram comparados com aqueles atingidos através de modelos que desprezam a influência da temperatura e do espectro sob a emissividade. A diferença entre os resultados foi de até 41% e demonstrou que o procedimento utilizado para estimar a temperatura tem significativa influência no resultado obtido.

Palavras-chave: termografia, espectro infravermelho, emissividade espectral, medição de temperatura, fresamento de metais.

Abstract

Temperature monitoring during the machining of metals is a way of understanding and controlling the cutting process. The use of infrared-based devices during the milling of metals has advantages, such as lower response time and the possibility of monitoring temperature profile. However, the software applied to commercial thermal imagers uses the simplified model of the diffuse-gray surface. The scientific literature shows that the emissivity of metallic surfaces depends on temperature, spectrum, and direction. Despite that, the studies about monitoring temperature during machining of metals often neglect those dependencies. This work proposes a methodology to estimate the temperature of metallic surfaces during face milling using thermal imagers. This procedure contains a step for the estimation of the metallic surface emissivity, taking into account the dependence on temperature, spectrum, and direction. An experimental approach was used to measure the variables that were applied to the post-processing routine. The mathematical model was iterative and based on a spectral-directional formulation of radiation heat transfer. AISI H13 steel was used as work material. The estimates of emissivity varied from 0,12 to 0,20 in the spectral band of $7,5 \mu m$ to $13 \mu m$ and temperature interval of $50 \text{ }^\circ\text{C}$ to $250 \text{ }^\circ\text{C}$. The workpiece temperature during milling was estimated for twelve different cutting conditions. The estimates ranged from $100 \text{ }^\circ\text{C}$ to $188 \text{ }^\circ\text{C}$. The results obtained using the proposed procedure were compared with the values from three alternative methods. These methods neglect the influences of the spectrum and temperature on the emissivity. Relative to the estimates from the directional-spectral procedure proposed in this work, the difference was up to 41%. It demonstrated that attention must be given to the temperature estimation procedure.

Keywords: thermography, infrared, spectral emissivity, temperature measurement, milling of metals.

Lista de ilustrações

Figura 1	– Representação bidimensional simbólica da resolução espacial de um termovisor. Fonte: Vollmer e Möllmann (2018) (Adaptado).	20
Figura 2	– Espectro de radiação térmica. Faixas espectrais típicas das câmeras IR comerciais em destaque. Fonte: Vollmer e Möllmann (2018) (Adaptado).	21
Figura 3	– Representação simbólica e simplificada da operação do sensor bolométrico. Fonte: Minkina e Dudzik (2009) (Adaptado).	22
Figura 4	– Representação simbólica de uma inspeção termográfica. Destaque para as três componentes radiométricas captadas pelo termovisor: emissão do objeto, reflexão do objeto e emissão da atmosfera.	23
Figura 5	– Reflexão na interface entre um meio absorvedor e o ar/vácuo.	26
Figura 6	– Fotografia do corpo de prova utilizado nos ensaios de medição de emissividade. Material: aço AISI H13. Dimensões: 105 mm x 20 mm x 16 mm. Destaque para a superfície superior contendo furo de diâmetro de 3 mm e profundidade de 8 mm.	36
Figura 7	– Montagem experimental para calibração do termopar tipo T. Termorresistência PT-100 utilizada como termômetro de referência.	37
Figura 8	– Montagem experimental para obtenção dos termogramas de resposta plena da amostra metálica aquecida.	38
Figura 9	– Amostra metálica durante os experimentos para medição da emissividade espectral. Valores de temperatura indicados se referem à temperatura de resposta plena e, portanto, não representam a temperatura termodinâmica da amostra.	38
Figura 10	– Processamento do sinal radiométrico realizado pelo termovisor.	39
Figura 11	– Diagrama do modelo matemático utilizado para estimar a emissividade espectral de metais.	41
Figura 12	– Montagem experimental para obtenção dos termogramas de resposta plena durante o fresamento frontal.	42
Figura 13	– Termogramas de resposta plena referentes a cada um dos doze testes de fresamento frontal realizados. Os valores de temperatura indicados são anteriores ao uso da rotina de pós-processamento e, portanto, não indicam a temperatura termodinâmica da peça.	43
Figura 14	– Diagrama do modelo matemático utilizado para estimar a temperatura da peça metálica durante o fresamento frontal.	44
Figura 15	– Resultados de emissividade espectral, no intervalo LWIR, da amostra de aço AISI H13 para as oito temperaturas do objeto testadas.	47

Figura 16 – Estimativas dos valores de emissividade espectral e suas respectivas incertezas expandidas para oito valores de comprimento de onda no intervalo LWIR em análise. Destaque para o efeito da temperatura e do espectro no resultado de medição da emissividade espectral.	48
Figura 17 – Fontes de incerteza e suas contribuições para as incertezas combinadas das estimativas de emissividade espectral. Destaque para a temperatura de resposta plena T_{full} como principal fonte de incerteza.	48
Figura 18 – Valores de emissividade direcional espectral extrapolados para ângulos de emissão de 0° a 75° , comprimentos de onda de $7,5 \mu m$ e $13 \mu m$ e temperaturas de $67^\circ C$ e $242^\circ C$	49
Figura 19 – Sinais espectrais normalizados para as oito temperaturas dos testes de estimação da emissividade. $S_{atm,\lambda}$ aproximadamente igual a zero no intervalo LWIR para todas as temperaturas testadas.	49
Figura 20 – Contribuição de cada uma das fontes de radiação para sinal pleno integrado no intervalo de $7,5 \mu m$ a $13 \mu m$. Destaque para a preponderância do sinal refletido nas situações de temperaturas mais baixas.	50
Figura 21 – Distribuição das estimativas de temperatura da peça durante o fresamento frontal para cada condição de corte testada.	51
Figura 22 – Estimativas de temperatura da peça durante o fresamento frontal com suas respectivas incertezas expandidas para as doze condições de corte testadas.	52
Figura 23 – Fontes de incerteza e suas contribuições para a incerteza combinada das estimativas de temperatura da peça durante o fresamento frontal. Ver Tabela 2 e Figura 21 para mais informações sobre os doze testes.	53
Figura 24 – Comparação das estimativas de temperatura da peça durante fresamento frontal obtidas a partir do método proposto neste trabalho e três métodos alternativos. $f(\lambda, T)$ se refere aos resultados obtidos a partir do método direcional espectral proposto neste trabalho, enquanto $f(T)$ indica as estimativas oriundas do modelo de superfície difusa e cinza. Ver Tabela 2 e Figura 21 para mais informações sobre os doze testes.	54
Figura 25 – Termovisor utilizado durante os experimentos. Fonte: FLIR (2011).	62
Figura 26 – Termo-higrômetro utilizado para monitoramento das condições ambientes. Fonte: Testo-SE (2009).	63
Figura 27 – Sistema de aquisição de dados utilizado para o termopar tipo T.	64
Figura 28 – Sistema de aquisição de dados utilizado para termorresistência.	65
Figura 29 – Termorresistência PT-100 4 fios Ecil.	66
Figura 30 – Fornos de calibração utilizados na calibração do termopar.	67
Figura 31 – Medidor de rugosidade Taylor Hobson Surtronic 25.	68
Figura 32 – Centro de usinagem ROMI Discovery 560.	69
Figura 33 – Fresa de diâmetro 50 mm e 3 dentes.	69

Lista de tabelas

Tabela 1 – Composição química, em percentual de massa (<i>wt%</i>), dos principais elementos ^[1] da amostra de aço AISI H13 e os limites estabelecidos por norma ^[2]	35
Tabela 2 – Condições de corte de cada um dos doze testes de fresamento realizados. . .	42
Tabela 3 – Incerteza das variáveis de entrada do cálculo de emissividade espectral. . . .	45
Tabela 4 – Incerteza das variáveis de entrada do cálculo da temperatura da peça durante o fresamento.	46
Tabela 5 – Características técnicas do termovisor utilizado durante os experimentos. Fonte: FLIR (2011).	62
Tabela 6 – Características técnicas do termo-higrômetro utilizado para monitoramento das condições ambientes. Fonte: Testo-SE (2009).	63
Tabela 7 – Características técnicas do sistema de aquisição de dados utilizado para o termopar tipo T. Fonte: National Instruments (2007).	64
Tabela 8 – Características técnicas do sistema de aquisição de dados utilizado para a termorresistência. Fonte: Keysight Technologies (2019).	65
Tabela 9 – Características técnicas da termorresistência utilizada.	66
Tabela 10 – Características técnicas dos fornos de calibração utilizados na calibração do termopar.	67
Tabela 11 – Características técnicas do medidor de rugosidade. Fonte: Taylor Hobson (2013).	68
Tabela 12 – Coeficientes do polinômio interpolador para termopar tipo T. Fonte: (BIPM, 1997).	70
Tabela 13 – Calibração do termopar tipo T no intervalo de 50 °C a 250 °C.	71

Lista de abreviaturas e siglas

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
BIPM	<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>
FOV	<i>Field of View</i> (Campo de Visão)
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i> (Guia para a Expressão da Incerteza de Medição)
IFOV	<i>Instantaneous Field of View</i> (Campo de Visão Instantâneo)
IR	<i>Infrared</i> (Infravermelho)
JCGM	<i>Joint Committee for Guides in Metrology</i>
LWIR	<i>Long-wavelength infrared</i> (Ondas longas do espectro infravermelho)
MWIR	<i>Mid-wavelength infrared</i> (Ondas médias do espectro infravermelho)
SWIR	<i>Short-wavelength infrared</i> (Ondas curtas do espectro infravermelho)
TCR	<i>Temperature coefficient of resistivity</i> (Coeficiente de temperatura da resistividade)

Lista de símbolos

a_p	profundidade de usinagem, mm
B	constante de calibração B (fator espectral)
c	coeficiente de sensibilidade
c_o	velocidade da luz no vácuo, m/s
d	distância, m
E	poder emissivo de corpo negro, W/m^2
f	distância focal, mm
f_z	avanço por dente, mm/rev
F	constante de calibração F (fator de forma)
h_p	constante de Planck, J_s
i_p	corrente de pulso, A
k	coeficiente de extinção
k_b	constante de Boltzmann, J/K
k_p	fator de cobertura
n	índice de refração
\tilde{n}	índice de refração complexo
r	resistividade elétrica, Ωcm
r_c	coeficiente de correlação
R	constante de calibração R (fator de resposta)
R_a	desvio médio aritmético do perfil de rugosidade, μm
S	sinal resposta do termovisor, V
S_k	sensibilidade espectral relativa do termovisor
T	temperatura, K
u	incerteza padrão

U	incerteza expandida
V	potencial elétrico, V
v_c	velocidade de corte, m/min
$wt\%$	composição em massa, %

Letras gregas

γ	coeficiente de temperatura da resistividade, K^{-1}
ε	emissividade
θ	ângulo de zênite, $^\circ$
λ	comprimento de onda, μm
ρ	refletividade
$\tilde{\rho}$	coeficiente de refletividade
ς	função conversão de sinal, $V/(Wm^{-2}sr^{-1})$
τ_{atm}	transmissividade da atmosfera no nível do chão
$\varphi\%$	umidade relativa, %

Subscritos

amb	relativo a ambiente
atm	relativo a atmosfera
b	relativo a corpo negro
c	relativo a combinado
$full$	relativo a resposta plena
o	relativo a referência
ob	relativo a objeto
ref	relativo a reflexão
λ	relativo a dependência em relação ao comprimento de onda
\parallel	relativo a paralelo
\perp	relativo a perpendicular

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Objetivo do trabalho	17
1.2	Estrutura do documento	18
2	Termografia para metais em processo de usinagem	19
2.1	Câmeras IR	19
2.1.1	Sensor bolométrico	21
2.1.2	Operação das câmeras IR	22
2.2	Emissividade	24
2.2.1	Métodos convencionais para medição de emissividade	25
2.2.2	Emissividade direcional espectral de meios absorvedores	26
2.2.3	Emissividade direcional espectral para metais	28
2.2.4	Resistividade elétrica de metais	29
2.3	Incerteza em medições indiretas	29
2.4	Medição de temperatura em usinagem	31
2.4.1	Termopares	32
2.4.2	Dispositivos IR	33
3	Metodologia	35
3.1	Estimativa de emissividade espectral	35
3.1.1	Montagem experimental	35
3.1.2	Rotina de pós-processamento	38
3.2	Estimativa da temperatura da peça metálica em fresamento	41
3.2.1	Montagem experimental	41
3.2.2	Rotina de pós-processamento	43
3.3	Análise de incertezas	44
3.3.1	Incerteza na estimativa da emissividade espectral	44
3.3.2	Incerteza na estimativa da temperatura da peça	45
4	Resultados	47
4.1	Estimativas de emissividade espectral	47
4.2	Análise dos sinais do termovisor	49
4.3	Estimativas de temperatura da peça	51
5	Conclusões	55
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	56
	Referências	57
	APÊNDICE A Fichas técnicas dos equipamentos	62
A.1	Termovisor	62
A.2	Termo-higrômetro	63

A.3	Sistema de aquisição de dados para termopar	64
A.4	Sistema de aquisição de dados para termorresistência	65
A.5	Termorresistência PT-100	66
A.6	Forno de calibração	67
A.7	Medidor de rugosidade	68
A.8	Centro de usinagem	69
APÊNDICE B Calibração do termopar		70
ANEXO A Análise química da amostra de aço AISI H13		72

1 Introdução

Durante o corte de metais acontece a conversão de trabalho mecânico em energia térmica. De acordo com Shaw (2005), cerca de 90% da energia mecânica converte-se em energia térmica durante a usinagem. A força aplicada pela ferramenta de corte contra a peça gera atrito, cisalhamento e deformação, o que culmina no aumento da temperatura (GAITONDE *et al.*, 2016). A carga térmica é capaz de afetar significativamente a eficiência de usinagem (MEDINA *et al.*, 2017; EFIMOVICH; ZOLOTUKHIN, 2020) e o desgaste da ferramenta de corte (PITTALÀ; MONNO, 2011; SIMEONE; WOOLLEY; RAHIMIFARD, 2015; GAITONDE *et al.*, 2016). Para a peça a ser usinada, a carga térmica pode levar a alterações indesejadas na microestrutura, formato, dimensão e rugosidade (CHEN *et al.*, 2013; KUCZMASZEWSKI; ZAGÓRSKI, 2013; MEDINA *et al.*, 2017), além de relacionar-se com a tensão residual na superfície usinada (MA *et al.*, 2016; MASMIATI *et al.*, 2016). Devido às múltiplas influências que a carga térmica pode apresentar durante um processo de usinagem, tem-se o monitoramento da temperatura como fonte de informação para entendimento e controle do processo de corte.

A medição de temperatura durante processos de usinagem é comumente realizada através de termopares e dispositivos infravermelhos. A termografia apresenta significativas vantagens em relação à medição realizada pelos termopares, notadamente pelo(a): possibilidade de visualizar os perfis de temperatura das superfícies durante o corte, menor tempo de resposta e oportunidade de medir sem contato (DAVIES *et al.*, 2007; LAURO *et al.*, 2014; HAN *et al.*, 2020). Por outro lado, a medição baseada no espectro infravermelho demanda maior atenção ao procedimento de execução, notadamente na estimativa das propriedades ópticas da superfície do objeto alvo e no processamento dos sinais radiométricos, além de não ser adequada para a medição da temperatura da interface cavaco-ferramenta (DAVIES *et al.*, 2007; FERREIRA *et al.*, 2019a; EFIMOVICH; ZOLOTUKHIN, 2020). A utilização de valores inadequados de emissividade pode comprometer uma medição realizada a partir de medidores de temperatura sem contato, e sabe-se que a emissividade de uma superfície pode apresentar forte dependência em relação à temperatura, espectro e direção (MIHALOW, 1988; HOWELL; MENGÜÇ; SIEGEL, 2016; KING *et al.*, 2017). Para superfícies metálicas, tem-se que a dependência espectral é de grande importância e, conseqüentemente, a simplificação do modelo de superfície cinza pode levar a resultados de medição distorcidos (HOWELL; MENGÜÇ; SIEGEL, 2016; VOLLMER; MÖLLMANN, 2018).

Apesar da termografia ser amplamente utilizada em monitoramento de temperatura de materiais metálicos, a emissividade é raramente tratada com sua dependência em relação à temperatura, espectro e direção. Muitos estudos presentes na literatura científica utilizaram termovisores para medir a temperatura de metais durante processos de corte, porém consideraram a emissividade da superfície metálica como um valor constante (KUCZMASZEWSKI; ZAGÓRSKI, 2013; LANE *et al.*, 2013; YASHIRO; OGAWA; SASAHARA, 2013; SIMEONE;

WOOLLEY; RAHIMIFARD, 2015; CUI *et al.*, 2017; MEDINA *et al.*, 2017). O valor da emissividade de uma superfície pode ser estimado a partir de modelos teóricos, relações semiempíricas, tabelas e medições experimentais (DAVIES *et al.*, 2007; KING *et al.*, 2017; FERREIRA *et al.*, 2019a).

Muitas formulações baseadas em modelos matemáticos derivados da teoria da onda eletromagnética podem ser encontrados na literatura científica (BRAMSON, 1968; ARATA; MIYAMOTO, 1976; HOWELL; MENGÜÇ; SIEGEL, 2016; OROSCO; COIMBRA, 2019). Estimativas experimentais da emissividade de uma superfície demandam, ao menos, a medição de sua temperatura termodinâmica e do fluxo de calor por radiação emitido por ela. A emissividade pode ser estimada a partir da razão entre o fluxo de calor emitido pela superfície e o fluxo de calor que um corpo negro emitiria quando sob temperatura igual a temperatura da superfície (ZHU; HOBBS; WILLMOTT, 2020). Se a análise é realizada para um dado valor de comprimento de onda e direção, estima-se a emissividade direcional espectral. Durante o procedimento experimental para estimar a emissividade, termopares embutidos são normalmente utilizados para medir a temperatura das superfícies, enquanto a medição da radiação emitida pelo objeto pode ser realizada a partir de variados sensores infravermelhos: pirômetros (KIM; LEE, 2014; ZHU; HOBBS; WILLMOTT, 2020), termovisores (LI *et al.*, 2011; VALIORGUE *et al.*, 2013; WANG *et al.*, 2015) e espectrômetros (DEL CAMPO *et al.*, 2010; WEN, 2010; WANG *et al.*, 2018).

No presente trabalho, a emissividade espectral, na banda de $7,5 \mu m$ a $13 \mu m$, de uma amostra de aço AISI H13 foi estimada para oito valores de temperatura no intervalo de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ a $250 \text{ }^\circ\text{C}$. Com os valores de emissividade espectral obtidos, estimou-se a temperatura de uma peça do mesmo aço durante o processo de fresamento frontal utilizando um termovisor e uma rotina de pós-processamento. A temperatura foi estimada para a área de contato entre a ferramenta de corte e a peça de aço AISI H13, sob doze condições de corte diferentes.

1.1 Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para medição de temperatura de superfícies metálicas durante processo de fresamento frontal utilizando termovisores que operam na faixa espectral do infravermelho longo.

Os objetivos específicos englobam:

- Estimar, por medição indireta e análise de incertezas, a emissividade de superfícies metálicas como uma variável dependente da temperatura, do espectro e da direção;
- Analisar o comportamento espectral dos sinais radiométricos processados pelo termovisor;
- Estimar, por medição indireta e análise de incertezas, a temperatura de uma peça metálica durante operação de fresamento frontal sob doze condições de corte diferentes;

- Comparar os resultados provenientes do procedimento de medição proposto com os resultados obtidos através dos métodos convencionais utilizados na literatura científica.

1.2 Estrutura do documento

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo a presente introdução o primeiro deles. O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica realizada, abordando: conceitos básicos sobre a operação dos termovisores, emissividade de superfícies metálicas, análise de incertezas em medições indiretas e medição de temperatura durante processos de usinagem de metais. O Capítulo 3 descreve a metodologia para estimar a temperatura da peça metálica, durante o processo de fresamento frontal, proposta no presente estudo. Os resultados obtidos e as conclusões são descritos, respectivamente, nos Capítulos 4 e 5. Após o Capítulo 5, apresentam-se as referências bibliográficas citadas ao longo do texto. O Apêndice A apresenta um descritivo dos equipamentos utilizados durante os experimentos demandados para a execução da pesquisa. Por fim, o Apêndice B traz informações sobre a calibração do termopar implementado nas montagens experimentais do presente trabalho, e o Anexo A contém o relatório de análise química da amostra metálica utilizada como corpo de prova.

2 Termografia para metais em processo de usinagem

2.1 Câmeras IR

As câmeras que operam no espectro infravermelho (câmeras IR) e os pirômetros são instrumentos utilizados para medição de temperatura de maneira não intrusiva, ou seja, não demandam contato com o corpo ou superfície cuja temperatura será medida. Os dois medidores possuem funcionamento regido pela termometria baseada no espectro infravermelho. Eles possuem sensores que atuam como transdutores que convertem radiação em sinais elétricos, os quais são processados e utilizados para calcular a temperatura do objeto alvo (KAPLAN, 2007).

Enquanto os pirômetros se limitam à medição de temperatura em apenas um ponto, as câmeras IR são capazes de medir a temperatura de vários pontos simultaneamente. Os pirômetros são instrumentos que demandam menor investimento financeiro e atendem bem situações em que se deseja conhecer a temperatura de um único ponto ou quando a distribuição espacial da temperatura é desprezível. As câmeras IR, por sua vez, são instrumentos capazes de fornecer maior quantidade de informações, uma vez que medem a temperatura de mais de um ponto. Dessa maneira, as câmeras IR podem ser utilizadas para analisar a distribuição de temperatura em uma superfície, a qual é apresentada, normalmente, através de uma imagem que apresenta escala de cor arbitrada para um determinado intervalo de temperatura. O baixo tempo de resposta e a possibilidade de avaliar o perfil de temperatura das superfícies são dois grandes diferenciais do uso dos termovisores (DAVIES *et al.*, 2007).

As aplicações das câmeras IR são diversas. Na indústria, esses equipamentos podem ser utilizados nas atividades de manutenção de componentes elétricos e componentes mecânicos (OSORNIO-RIOS; ANTONINO-DAVIU; ROMERO-TRONCOSO, 2019). Outro campo de aplicação é a medicina, através da detecção de padrões de temperatura anormais, os quais podem ser associados a doenças como câncer de mama, doenças vasculares e reumatismo, além da detecção de febre (LAHIRI *et al.*, 2012). Câmeras IR ainda podem ser úteis durante a vistoria de construções civis, permitindo a detecção de vazamento de água, monitoramento de isolamento térmico e vazamento de gases (LUCCHI, 2018). Diante da ampla gama de aplicações, a escolha do termovisor deve ser feita com cautela. Dentre os principais parâmetros a serem observados, pode-se destacar a resolução espacial e a faixa espectral de operação do termovisor (BAGAVATHIAPPAN *et al.*, 2013).

A resolução espacial de um termovisor depende do campo de visão do sistema de lentes (FOV, *Field of View*), do tamanho dos detectores e da distância existente entre o termovisor e o objeto a ser inspecionado. A análise do IFOV (*Instantaneous Field of View*) permite saber a área que cada pixel da câmera IR representa e determinar a menor área que pode ser inspecionada

(MINKINA; DUDZIK, 2009). A Figura 1 traz uma representação bidimensional do conceito de resolução espacial e a Equação 2.1 apresenta o cálculo do IFOV, sendo f a distância focal do termovisor e d a distância entre o termovisor e o objeto alvo. Destaca-se que, para minimizar o efeito de aberrações ópticas, recomenda-se assumir o menor tamanho inspecionável por um termovisor igual a três vezes o valor do comprimento projetado indicado pela Equação 2.1 (VOLLMER; MÖLLMANN, 2018).

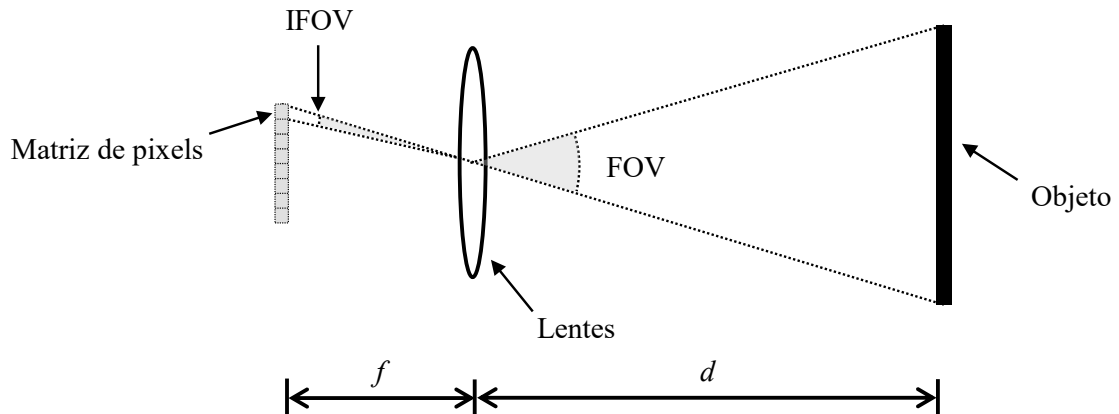


Figura 1 – Representação bidimensional simbólica da resolução espacial de um termovisor. Fonte: Vollmer e Möllmann (2018) (Adaptado).

$$\text{Comprimento projetado} = \text{IFOV } d = \left(\frac{\text{FOV}}{\text{pixels}} \right) d. \quad (2.1)$$

Conforme a Figura 2, a radiação térmica se estende de $0,1 \mu\text{m}$ a $1000 \mu\text{m}$, englobando parte do espectro ultravioleta, todo o espectro visível e infravermelho, sendo o último a sua maior parcela. Todavia, os sensores utilizados nas câmeras IR são sensíveis a apenas um determinado intervalo do espectro infravermelho. Tipicamente, existem três bandas espectrais bem definidas na termografia: infravermelho de ondas longas (*Long-Wavelength Infrared - LWIR*), de $8 \mu\text{m}$ a $14 \mu\text{m}$; infravermelho de ondas médias (*Mid-Wavelength Infrared - MWIR*), de $3 \mu\text{m}$ a $5 \mu\text{m}$; infravermelho de ondas curtas (*Short-Wavelength Infrared - SWIR*), de $0,9 \mu\text{m}$ a $1,7 \mu\text{m}$. A escolha desses três intervalos se justifica a partir de três pontos: a intensidade de radiação térmica emitida pelos corpos, as propriedades físicas dos detectores comumente utilizados e a transmissividade da atmosfera existente entre o termovisor e o seu objeto alvo (VOLLMER; MÖLLMANN, 2018).

Os sensores de radiação IR podem ser divididos em dois grupos principais: sensores térmicos e sensores fotônicos (VOLLMER; MÖLLMANN, 2018). Os sensores fotônicos se caracterizam por serem transdutores de um estágio, isto é, a radiação incidente promove um desequilíbrio na concentração ou na mobilidade dos portadores de carga, gerando alteração na resistência elétrica ou geração de fotocorrente. Já os sensores térmicos se caracterizam por serem transdutores de dois estágios. Primeiramente a parcela da radiação que é absorvida promove aumento da temperatura. A alteração da temperatura gera alguma alteração de propriedade física no sensor, tal como variação de resistência elétrica e geração de força eletromotriz ou corrente

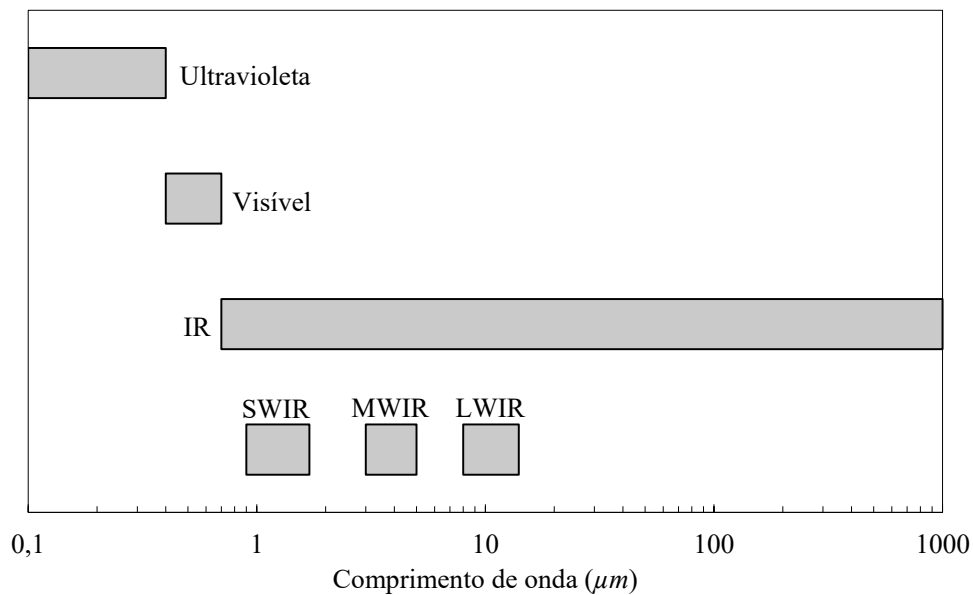


Figura 2 – Espectro de radiação térmica. Faixas espectrais típicas das câmeras IR comerciais em destaque. Fonte: Vollmer e Möllmann (2018) (Adaptado).

elétrica (ROGALSKI, 2002). Alguns exemplos de sensores térmicos são os bolômetros, as pilhas termoelétricas e os detectores piroelétricos (MINKINA; DUDZIK, 2009).

Termovisores que utilizam sensores fotônicos operam em temperaturas criogênicas, com o intuito de minimizar ruídos que possam comprometer a medição do detector. A tecnologia necessária para refrigeração dos sensores faz as câmeras fotônicas demandarem alto investimento financeiro e dificulta a sua portabilidade, o que pode inviabilizar o seu uso para determinadas situações (ROGALSKI; MARTYNIUK; KOPYTKO, 2016). Para câmeras IR que operam na banda espectral LWIR, tem-se que o mercado é majoritariamente ocupado pelos sensores térmicos, notadamente devido ao alto custo de comercialização das câmeras de sensores fotônicos (LA VEIGNE *et al.*, 2010). Os termovisores LWIR apresentam inúmeras aplicações, destacando-se o setor de segurança (detecção de veículos e pessoas, combate a incêndios, etc.) e comercial (manutenção preventiva em painéis elétricos, detecção de vazamentos em construções civis, etc.) (SVATOSŠ *et al.*, 2018).

2.1.1 Sensor bolométrico

Dentre os sensores de radiação no espectro infravermelho classificados como térmicos, tem-se maior destaque para os sensores bolométricos no que diz respeito ao mercado de câmeras IR. Em 2010, os termovisores baseados na operação de microbolômetros corresponderam a 95% do mercado (ROGALSKI; MARTYNIUK; KOPYTKO, 2016). Avanços alcançados na década de 1980 permitiram combinar a matriz de microbolômetros a um circuito integrado para leitura no plano focal (SVATOSŠ *et al.*, 2018). Dessa forma, constituiu-se efetivamente o termovisor baseado no sensor bolométrico.

A estrutura de um microbolômetro pode ser separada em três partes: filme termossensível,

substrato isolante e circuito integrado de leitura (VOLLMER; MÖLLMANN, 2018). A operação do sensor bolométrico inicia-se a partir da absorção de radiação no espectro infravermelho pelo filme termossensível. Os dois principais materiais absorvedores utilizados são o silício amorfo e o óxido de vanádio (ROGALSKI; MARTYNIUK; KOPYTKO, 2016). A absorção da radiação provoca o aumento da temperatura (T) e, conseqüentemente, na alteração da resistência elétrica (r) do material absorvedor. Tal mudança é detectada pelo circuito integrado de leitura a partir de uma corrente de pulso (i_p) que percorre o material termossensível (CHEN; LV; YI, 2011). A variação da resistência elétrica é captada a partir da diferença de potencial elétrico (ΔV).

A operação do sensor bolométrico é ilustrada na representação simbólica e simplificada apresentada na Figura 3.

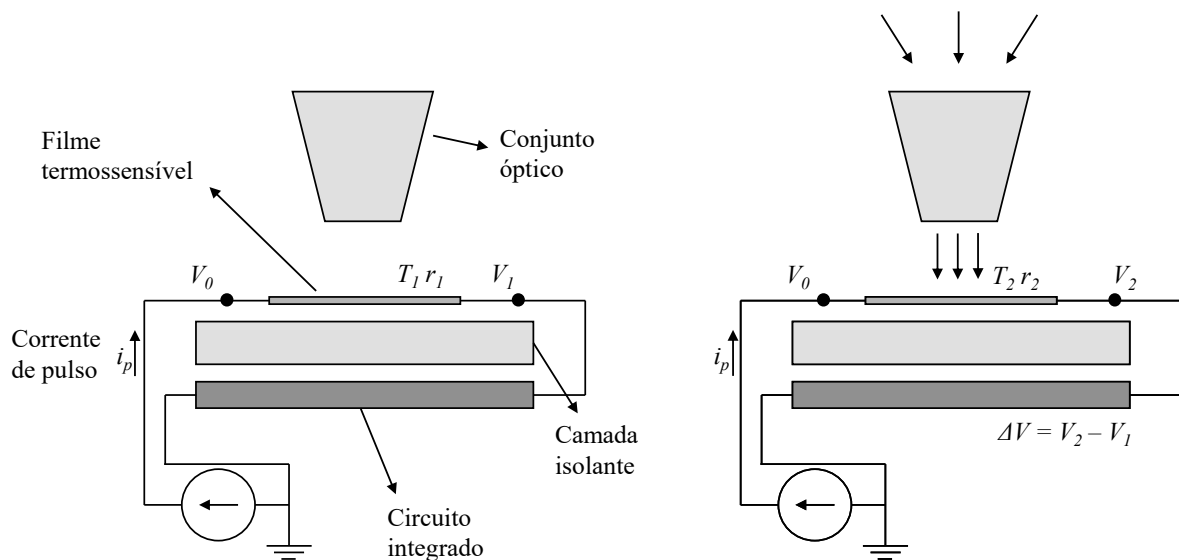


Figura 3 – Representação simbólica e simplificada da operação do sensor bolométrico. Fonte: Minkina e Dudzik (2009) (Adaptado).

2.1.2 Operação das câmeras IR

Em condições gerais, durante um ensaio termográfico, pode-se dizer que os sensores recebem radiação de três fontes distintas: radiação emitida pelo objeto alvo, radiação emitida pela vizinhança e refletida pelo objeto alvo e radiação emitida pela coluna de ar existente entre o termovisor e o objeto alvo (MINKINA; DUDZIK, 2009). A este conjunto de sinais de entrada, o termovisor responde com um sinal resposta de natureza eletrônica. Todavia, somente a radiação emitida pela superfície alvo contém a informação necessária para estimar a sua temperatura. Portanto, faz-se necessário um processamento de sinais para separar as três componentes radiativas.

Para calcular a temperatura da superfície do objeto alvo (T_{ob}), um equacionamento matemático é utilizado pelo software dos termovisores comerciais. Tal formulação demanda as seguintes informações: emissividade total da superfície (ε), temperatura refletida (T_{ref}),

temperatura atmosférica (T_{atm}), umidade relativa ambiente ($\varphi\%$) e distância entre o termovisor e o objeto alvo (d). Conforme Tran *et al.* (2017), a Equação 2.2 apresenta o equacionamento matemático dos termovisores comerciais para cálculo da temperatura da superfície do objeto alvo

$$T_{ob} = \left[\frac{T_{full}^4 - (1 - \varepsilon) \tau_{atm} T_{ref}^4 - (1 - \tau_{atm}) T_{atm}^4}{\varepsilon \tau_{atm}} \right]^{0,25}, \quad (2.2)$$

onde T_{full} se refere à temperatura de resposta plena ou temperatura aparente, isto é, a temperatura que o objeto apresentaria caso se comportasse como um corpo negro ($\varepsilon = 1$) e a distância entre ele e o termovisor fosse zero ($d = 0$). Justifica-se o uso do termo temperatura de resposta plena pelo fato de ela estar relacionada com a situação em que software da câmera IR considera o sinal resposta composto apenas pela emissão do objeto. Nesta situação, não há influência das considerações e simplificações inerentes ao processamento de sinais realizado pelo termovisor.

A Figura 4 apresenta uma representação simbólica de uma inspeção termográfica genérica. Nela pode-se observar as grandezas físicas que o software das câmeras IR comerciais demandam para fazer a medição de temperatura sem contato (ε , T_{ref} , T_{atm} , $\varphi\%$ e d). O símbolo E se refere a poder emissivo de corpo negro, dado pela Lei de Stefan-Boltzmann. Já τ_{atm} diz respeito a transmissividade atmosférica da coluna de ar existente entre o termovisor e o seu objeto alvo.

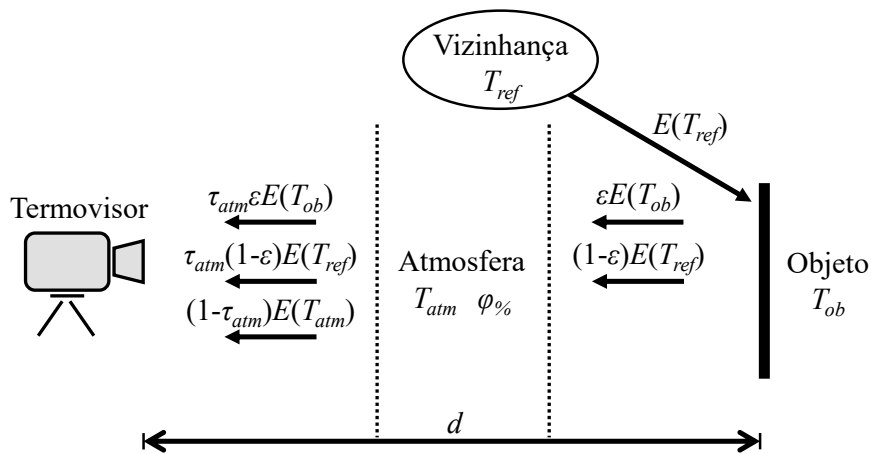


Figura 4 – Representação simbólica de uma inspeção termográfica. Destaque para as três componentes radiométricas captadas pelo termovisor: emissão do objeto, reflexão do objeto e emissão da atmosfera.

Conforme a Figura 4, a atmosfera existente entre o termovisor e o objeto alvo é responsável por atenuar a radiação que parte da superfície do objeto. Tal efeito pode ser analisado através da estimativa da transmissividade da atmosfera no nível do chão. Minkina e Daniel (2015) apresentaram uma formulação simplificada para estimar a transmissividade da coluna de ar entre um termovisor e seu objeto alvo para o intervalo espectral LWIR. Para tanto, utilizaram os valores de T_{atm} , $\varphi\%$ e d . As Equações 2.3 e 2.4 trazem tal equacionamento, nas quais: $K_{atm} = 1,9$; $\alpha_1 = 0,0660$; $\alpha_2 = 0,0126$; $\beta_1 = -0,0023$; $\beta_2 = -0,0067$; $h_1 = 1,5587$; $h_2 = 6,9390 \cdot 10^{-2}$; $h_3 = -2,7816 \cdot 10^{-4}$; $h_4 = 6,8455 \cdot 10^{-7}$. Os valores de temperatura devem ser utilizados em graus Celsius.

$$\omega = \frac{\varphi\%}{100} \exp(h_1 + h_2 T_{atm} + h_3 T_{atm}^2 + h_4 T_{atm}^3), \quad (2.3)$$

$$\tau_{atm} = K_{atm} \exp[-d^{0,5} (\alpha_1 + \beta_1 \omega^{0,5})] + (1 - K_{atm}) \exp[-d^{0,5} (\alpha_2 + \beta_2 \omega^{0,5})]. \quad (2.4)$$

Conforme descrito na Subseção 2.1.1, o sensor utilizado pelo termovisor responde à irradiação com um sinal de natureza eletrônica. Durante os testes de calibração, a relação entre o sinal resposta emitido pelos sensores e a temperatura de objetos emissores é definida. Os testes de calibração são conduzidos utilizando condições ambientes controladas e radiadores padrões como objetos emissores. Dessa maneira, pode-se simplificar a condição apresentada na Figura 4, uma vez que a radiação emitida pelo objeto alvo passa a ser a principal componente de radiação. Sucessivos testes são realizados utilizando os radiadores padrões em uma ampla faixa de temperaturas. Por fim, obtém-se uma curva de calibração para cada intervalo de temperatura (MINKINA; DUDZIK, 2009).

A Equação 2.5 é a função exponencial tipicamente utilizada para calibração de termovisores, sendo: S o sinal eletrônico processado pelo termovisor, T a temperatura em kelvin, R o fator de resposta, B o fator espectral e F o fator de forma. Os parâmetros R , B e F são obtidos durante o processo de calibração do termovisor, normalmente pelo método dos mínimos quadrados para obter o melhor ajuste para a curva. Tais parâmetros tendem a não ser constantes para toda a faixa de temperatura em que o termovisor opera, a fim de evitar a possibilidade de saturação dos detectores e otimizar a sensibilidade à temperatura (VOLLMER; MÖLLMANN, 2018).

$$S(T) = \frac{R}{\exp\left(\frac{B}{T}\right) - F}. \quad (2.5)$$

2.2 Emissividade

A emissividade (ε) é uma grandeza que relaciona a energia emitida por uma superfície com a sua temperatura absoluta. Ela é influenciada por diversos fatores, dentre os quais se destacam a temperatura (T), o espectro (λ) e a direção de emissão (θ) (HOWELL; MENGÜÇ; SIEGEL, 2016). O acabamento superficial, a presença de impurezas, a composição química, a estrutura cristalina e a polarização da radiação também possuem efeito sobre o valor da emissividade (MODEST, 2013).

A emissividade é calculada através do quociente do fluxo de calor emitido pela superfície em estudo pelo fluxo de calor que seria emitido por um corpo negro que estivesse sob temperatura igual a temperatura da superfície (ZHU; HOBBS; WILLMOTT, 2020). Conforme Howell, Mengüç e Siegel (2016), a emissividade direcional espectral $\varepsilon_\lambda(T, \theta)$ de uma superfície qualquer pode ser definida como a razão entre a sua intensidade espectral $I_\lambda(T, \theta)$ e a intensidade espectral de um corpo negro $I_{\lambda,b}(T)$ sob mesma temperatura, conforme Equação 2.6.

$$\varepsilon_{\lambda}(T, \theta) = \frac{I_{\lambda}(T, \theta)}{I_{\lambda,b}(T)}. \quad (2.6)$$

A intensidade espectral de um corpo negro é obtida a partir da formulação de Planck, Equação 2.7, na qual n se refere ao índice de refração do meio em que a radiação se propaga. As constantes C_1 (Equação 2.8) e C_2 (Equação 2.9) são obtidas a partir da constante de Planck (h_p), da constante de Boltzmann (k_b) e da velocidade da luz no vácuo (c_o). Seus valores são $0,595522 \cdot 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4\text{m}^{-2}\text{sr}^{-1}$ e $14387,77 \mu\text{mK}$, respectivamente.

$$I_{\lambda,b}(T) = \frac{2C_1}{n^2 \lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{n\lambda T}\right) - 1 \right]}, \quad (2.7)$$

$$C_1 = h_p c_o^2, \quad (2.8)$$

$$C_2 = \frac{h_p c_o}{k_b}. \quad (2.9)$$

2.2.1 Métodos convencionais para medição de emissividade

A emissividade é uma grandeza fundamental para analisar o comportamento radiativo de uma dada superfície. Utilizar valores errados de emissividade pode comprometer os resultados e a análise de um dado experimento (MIHALOW, 1988). Conhecer bem a emissividade de uma superfície não é uma tarefa fácil. Existem dados de emissividade presentes na literatura para diversos materiais, porém devido aos vários fatores que influenciam a emissividade de uma superfície, nem sempre é possível utilizar tais informações. Para medições que não se destinam a análises puramente qualitativas, não é aconselhável o uso de valores de emissividade tabelados (KAPLAN, 2007).

Para garantir menores probabilidades de erro durante análises de transferência de calor por radiação, a emissividade das superfícies é, na maioria das vezes, estimada experimentalmente (MINKINA; DUDZIK, 2009). Na literatura técnica e científica são apresentadas muitas opções de métodos para medir a emissividade de superfícies. De acordo com Vollmer e Möllmann (2018), tais métodos estimam, na realidade, a emissividade direcional integrada para o intervalo de comprimento de onda de operação da câmera IR. Dessa maneira, a influência do espectro na emissividade não é efetivamente captada.

Para estimar a emissividade de uma superfície, ao menos duas medições serão necessárias: medir a temperatura termodinâmica de tal superfície e medir o fluxo de calor por radiação emitido por ela. A temperatura da superfície pode ser obtida através de medidores de temperatura por contato ou revestindo uma parte da superfície em estudo com uma tinta de emissividade conhecida, por exemplo (MINKINA; DUDZIK, 2009). Com a temperatura da fonte emissora conhecida, aponta-se o dispositivo infravermelho para a superfície alvo e faz-se o ajuste do valor de emissividade até que a temperatura indicada pelo instrumento seja igual a temperatura de referência.

O procedimento de estimar a emissividade de uma superfície através do ajuste do valor de temperatura indicado no visor da câmera IR pode ser matematicamente expressado através do rearranjo da Equação 2.2 na forma da Equação 2.10.

$$\varepsilon = \frac{T_{full}^4 - \tau_{atm} T_{ref}^4 - (1 - \tau_{atm}) T_{atm}^4}{\tau_{atm} (T_{ob}^4 - T_{ref}^4)}. \quad (2.10)$$

2.2.2 Emissividade direcional espectral de meios absorvedores

As propriedades radiativas das superfícies opticamente suaves podem ser estimadas a partir de correlações derivadas da teoria da onda eletromagnética (HOWELL; MENGÜÇ; SIEGEL, 2016). Tais correlações utilizam as propriedades ópticas, índice de refração n e coeficiente de extinção k , das superfícies para calcular suas propriedades radiativas, tais como emissividade (ε) e refletividade (ρ). Para tanto, os meios são divididos em dois grandes grupos: meios dielétricos e meios condutores de eletricidade. Os metais fazem parte do segundo grupo, tendo por característica valores elevados de coeficiente de extinção.

Para a situação de radiação percorrendo ar ou vácuo (índice de refração unitário e coeficiente de extinção nulo) e incidindo em um meio absorvedor (Figura 5), as relações de Fresnel predizem o comportamento da refletividade do meio absorvedor a partir da teoria da onda eletromagnética. As Equações 2.11, 2.12, 2.13 e 2.14 apresentam os coeficientes de refletividade da superfície opticamente suave do meio absorvedor para radiação oriunda do ar ou do vácuo. Nelas, tem-se que θ_i se refere ao ângulo de incidência da radiação, $\tilde{\rho}_{\lambda\parallel}$ é o coeficiente de refletividade para radiação polarizada paralelamente e $\tilde{\rho}_{\lambda\perp}$ é o coeficiente de refletividade para radiação polarizada perpendicularmente.

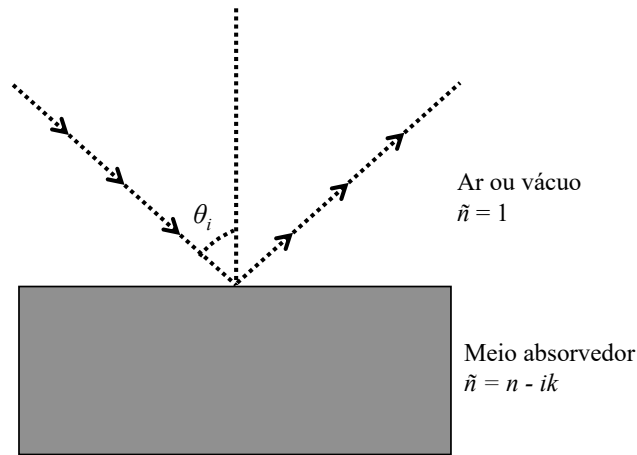


Figura 5 – Reflexão na interface entre um meio absorvedor e o ar/vácuo.

$$\tilde{\rho}_{\lambda\parallel}(\theta_i) = \frac{(p_1 - ip_2) - (p_1^2 - p_2^2 + \sin^2\theta_i - 2ip_1p_2) \cos\theta_i}{(p_1 - ip_2) + (p_1^2 - p_2^2 + \sin^2\theta_i - 2ip_1p_2) \cos\theta_i}, \quad (2.11)$$

$$\tilde{\rho}_{\lambda\perp}(\theta_i) = \frac{\cos\theta_i - (p_1 - ip_2)}{\cos\theta_i + (p_1 - ip_2)}, \quad (2.12)$$

$$p_1^2 = 0,5 \left\{ \left[(n_\lambda^2 - k_\lambda^2 - \sin^2\theta_i)^2 + 4n_\lambda^2 k_\lambda^2 \right]^{0,5} + (n_\lambda^2 - k_\lambda^2 - \sin^2\theta_i) \right\}, \quad (2.13)$$

$$p_2^2 = 0,5 \left\{ \left[(n_\lambda^2 - k_\lambda^2 - \sin^2\theta_i)^2 + 4n_\lambda^2 k_\lambda^2 \right]^{0,5} - (n_\lambda^2 - k_\lambda^2 - \sin^2\theta_i) \right\}. \quad (2.14)$$

Meios absorvedores, tais como materiais metálicos, tendem a apresentar alto índice de refração e alto coeficiente de extinção para comprimentos de onda no espectro infravermelho (MODEST, 2013). Assumindo n e k muito maiores que 1, o termo $\sin^2\theta_i$ pode ser desprezado nas Equações 2.13 e 2.14. Dessa maneira, tem-se que $p_1 = n_\lambda$ e $p_2 = k_\lambda$. Para tal condição, as Equações 2.11 e 2.12 podem ser reescritas na forma das Equações 2.15 e 2.16.

$$\tilde{\rho}_{\lambda\parallel}(\theta_i) = \frac{(1 - n_\lambda \cos\theta_i) + ik_\lambda \cos\theta_i}{(1 + n_\lambda \cos\theta_i) - ik_\lambda \cos\theta_i}, \quad (2.15)$$

$$\tilde{\rho}_{\lambda\perp}(\theta_i) = \frac{(\cos\theta_i - n_\lambda) + ik_\lambda}{(\cos\theta_i + n_\lambda) + ik_\lambda}. \quad (2.16)$$

Conforme Modest (2013), a refletividade ρ pode ser obtida a partir dos coeficientes de refletividade, multiplicando-os pelos seus respectivos complexos conjugados. Dessa forma, a refletividade direcional espectral, de materiais de n e k significativamente maiores que 1, para radiação polarizada paralelamente e para radiação polarizada perpendicularmente pode ser obtida a partir das Equações 2.17 e 2.18, respectivamente.

$$\rho_{\lambda\parallel}(\theta_i) = \frac{(n_\lambda \cos\theta_i - 1)^2 + (k_\lambda \cos\theta_i)^2}{(n_\lambda \cos\theta_i + 1)^2 + (k_\lambda \cos\theta_i)^2}, \quad (2.17)$$

$$\rho_{\lambda\perp}(\theta_i) = \frac{(n_\lambda - \cos\theta_i)^2 + k_\lambda^2}{(n_\lambda + \cos\theta_i)^2 + k_\lambda^2}. \quad (2.18)$$

Materiais absorvedores suficientemente espessos podem ser considerados opacos e, portanto, sua transmissividade pode ser desprezada. Por conservação de energia, tem-se que a absorptividade de corpos opacos pode ser obtida a partir da refletividade, conforme Equação 2.19. Para propriedades direcionais espectrais, as relações da Lei de Kirchhoff garantem que $\varepsilon_\lambda(\theta, T) = \alpha_\lambda(\theta, T)$. Portanto, tem-se que as Equações 2.20 e 2.21 expressam a emissividade para radiação polarizada paralelamente e para radiação polarizada perpendicularmente (respectivamente).

$$\alpha_\lambda(\theta_i, T) = 1 - \rho_\lambda(\theta_i, T), \quad (2.19)$$

$$\varepsilon_{\lambda\parallel}(\theta, T) = 1 - \rho_{\lambda\parallel}(\theta, T) = \frac{4n_\lambda \cos\theta}{(n_\lambda^2 + k_\lambda^2) \cos^2\theta + 2n_\lambda \cos\theta + 1}, \quad (2.20)$$

$$\varepsilon_{\lambda\perp}(\theta, T) = 1 - \rho_{\lambda\perp}(\theta, T) = \frac{4n_\lambda \cos\theta}{\cos^2\theta + 2n_\lambda \cos\theta + (n_\lambda^2 + k_\lambda^2)}. \quad (2.21)$$

2.2.3 Emissividade direcional espectral para metais

A teoria da onda eletromagnética permite obter expressões matemáticas que calculam as propriedades radiativas de meios absorvedores de superfícies opticamente suaves a partir das suas propriedades ópticas. Dentre os meios absorvedores, os metais se destacam como materiais de vasta aplicação na engenharia. Enquanto medições experimentais das propriedades ópticas das superfícies metálicas não são simples de se realizar, estimativas podem ser obtidas a partir de suas propriedades elétricas. Tais estimativas podem ser aplicadas nas equações derivadas a partir da teoria da onda eletromagnética para prever os valores das propriedades radiativas de superfícies metálicas.

A relação de Hagen-Rubens é uma expressão que pode ser utilizada quando o material metálico apresenta baixa resistividade elétrica e as propriedades ópticas serão estimadas para comprimentos de onda longos ($\lambda > 5\mu m$). A Equação 2.22 apresenta a relação de Hagen-Rubens, sendo r a resistividade elétrica (Ωcm) e λ o comprimento de onda (μm) (HAGEN; RUBENS, 1900).

$$n_\lambda = k_\lambda = \left(\frac{0,003\lambda}{r_e} \right)^{0,5}. \quad (2.22)$$

A relação de Hagen-Rubens é uma aproximação, havendo outros equacionamentos mais complexos apresentados na literatura científica, tais como o modelo Drude e o modelo de Drude-Roberts (INDHU *et al.*, 2018). A consideração $n_\lambda = k_\lambda$ é, geralmente, inapropriada, notadamente para metais puros. Para ligas metálicas, ela parece ser razoável (BOYDEN; ZHANG, 2006). Boas estimativas de emissividade espectral, quando comparadas com resultados experimentais, foram encontradas utilizando a relação de Hagen-Rubens no intervalo espectral LWIR (TEODORESCU, 2007; GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ *et al.*, 2012).

Combinando as Equações 2.20 e 2.21 com a Equação 2.22 obtém-se as Equações 2.23 e 2.24, as quais calculam a emissividade direcional espectral de uma superfície metálica a partir do comprimento de onda λ , do ângulo de zênite de emissão θ e da resistividade elétrica r . A Equação 2.25 calcula a emissividade direcional espectral para radiação não polarizada a partir da média aritmética das emissividades para radiação polarizada paralelamente e perpendicularmente.

$$\varepsilon_{\lambda\parallel}(\theta) = \frac{4 \left(\frac{0,003\lambda}{r} \right)^{0,5} \cos\theta}{\frac{0,006\lambda}{r} \cos^2\theta + 2 \left(\frac{0,003\lambda}{r} \right)^{0,5} \cos\theta + 1}, \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_{\lambda\perp}(\theta) = \frac{4 \left(\frac{0,003\lambda}{r} \right)^{0,5} \cos\theta}{\cos^2\theta + 2 \left(\frac{0,003\lambda}{r} \right)^{0,5} \cos\theta + \frac{0,006\lambda}{r}}, \quad (2.24)$$

$$\varepsilon_\lambda(\theta) = \frac{\varepsilon_{\lambda\parallel}(\theta) + \varepsilon_{\lambda\perp}(\theta)}{2}. \quad (2.25)$$

As Equações 2.23 e 2.24 podem ser utilizadas para superfícies metálicas opticamente suaves (condição da teoria da onda eletromagnética), não sendo adequadas para estimativas em que $\lambda < 5\mu m$ (restrição para utilização da relação de Hagen-Rubens). As superfícies reais

tendem a aproximar-se do comportamento de superfícies opticamente suaves quando a razão entre o comprimento de onda da radiação em análise e a rugosidade da superfície é maior que 1 (HOWELL; MENGÜÇ; SIEGEL, 2016; OROSCO; COIMBRA, 2019). Desse modo, a análise do acabamento superficial da superfície metálica deve receber atenção.

2.2.4 Resistividade elétrica de metais

Conforme apresentado em Kasap (2018), a resistividade elétrica de materiais metálicos pode ser calculada a partir da temperatura do metal. Para tanto, é preciso conhecer previamente o coeficiente de temperatura da resistividade γ (*temperature coefficient of resistivity*, TCR). A definição do coeficiente de temperatura da resistividade é dado pela Equação 2.26.

$$\gamma(T) = \frac{1}{r} \frac{dr}{dT}. \quad (2.26)$$

A partir da definição do coeficiente de temperatura da resistividade (expressa pela Equação 2.26) e assumindo o TCR constante em relação à temperatura (consideração válida para pequenos valores de ΔT), é possível obter a Equação 2.27, a qual apresenta a resistividade elétrica de um metal como função da temperatura em que ele se encontra. Para tanto, faz-se necessário conhecer o valor do coeficiente γ e de valores de referência de resistividade (r_o) e temperatura (T_o).

$$r(T) = r_o \exp[\gamma(T) (T - T_o)]. \quad (2.27)$$

O coeficiente de temperatura da resistividade de um metal é também função da temperatura em que ele se encontra e somente deve ser considerado constante para pequenas variações de temperatura. Aplicando a aproximação pelo segundo termo da série de Taylor para a função exponencial da Equação 2.27, obtém-se a Equação 2.28, com a qual é possível deduzir uma formulação (Equação 2.29) para estimar o valor de $\gamma(T)$ em função de um estado de referência (γ_o, T_o).

$$r(T) = r_o [1 + \gamma (T - T_o)], \quad (2.28)$$

$$\gamma(T) = \left[\frac{1}{\gamma_o} + (T - T_o) \right]^{-1}. \quad (2.29)$$

2.3 Incerteza em medições indiretas

O *Joint Committee for Guides in Metrology* (JCGM), através do Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM) (JCGM, 2008), apresentou orientações para o procedimento de análise de incertezas de medições diretas e medições indiretas. Conforme o GUM, as incertezas de medição podem ser avaliadas como incertezas tipo A e incertezas tipo B. As incertezas tipo A são avaliadas a partir de uma sequência de observações associadas a uma investigação

estatística. Por outro lado, quando não é viável a realização de muitas observações de um mensurando, a incerteza tipo B torna-se a melhor alternativa. As incertezas tipo B utilizam, no lugar das sucessivas observações seguidas de análise estatística, informações disponíveis sobre o mensurando, tais como as instruções do fabricante do instrumento de medição utilizado, relatórios de calibração e experiências prévias.

O resultado de medição é composto por uma estimativa do valor nominal e a incerteza da medição (FIGLIOLA, 2019). A incerteza se refere a um intervalo no qual a dispersão da estimativa da variável mensurada tem maior probabilidade de se encontrar. Em medições indiretas, o mensurando é medido a partir de um grupo de variáveis de entrada. Na prática, todas as medições são estimativas do real valor, portanto uma estimativa do mensurando (y) é obtida a partir das estimativas de um conjunto de variáveis de entrada (x_i). Para tanto, uma relação predefinida entre as variáveis de entrada e a variável de saída deve ser conhecida (Equação 2.30).

$$y = f(x_1, x_2, x_3, (\dots), x_m). \quad (2.30)$$

Cada estimativa para as variáveis de entrada carrega consigo um valor de incerteza padrão u_{x_i} . A incerteza da medição indireta será obtida pela propagação e combinação das incertezas padrões das variáveis de entrada. A incerteza padrão combinada u_c definirá uma dispersão razoável para a estimativa da variável medida indiretamente. O cálculo da incerteza padrão combinada de uma medição indireta dependerá do grau de correlação entre as variáveis de entrada. Genericamente, a Equação 2.31 permite calcular a incerteza combinada, sendo r_c o grau de correlação entre um par de variáveis de entrada e c o coeficiente de sensibilidade, o qual pode ser obtido a partir da derivada parcial apresentada na Equação 2.32. Considerando todas as variáveis como não correlacionadas ($r_c = 0$), tem-se que a Equação 2.31 pode ser reescrita na forma simplificada da Equação 2.33.

$$u_{cy}^2 = \sum_{i=1}^m [c_i u_{x_i}]^2 + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m c_i c_j u_{x_i} u_{x_j} r_c(x_i, x_j), \quad (2.31)$$

$$c_i = \frac{\partial y}{\partial x_i}, \quad (2.32)$$

$$u_{cy}^2 = \sum_{i=1}^m [c_i u_{x_i}]^2. \quad (2.33)$$

Para um cenário de medição termográfica, a determinação do grau de correlação entre as variáveis de entrada não é trivial. Minkina e Dudzik (2009) mostraram em sua análise de incertezas de medição durante ensaios termográficos que, dentre todas as variáveis de entrada, o grau de correlação entre as variáveis emissividade do objeto alvo e radiação refletiva por ele é aquela que mais pode impactar no cálculo da incerteza combinada da medição da temperatura. Os autores indicaram que negligenciar a correlação entre essas duas variáveis pode levar a erros de até 1% no valor de incerteza relativa. Lane *et al.* (2013) mostraram que, para pequenos valores de incerteza padrão na medição da temperatura refletida T_{ref} , o cálculo da incerteza propagada

durante um ensaio termográfico pode ser realizado considerando a simplificação de variáveis não correlacionadas.

Após a combinação das incertezas padrões das variáveis de entrada, faz-se necessário converter a incerteza padrão combinada u_c na incerteza expandida combinada U_c . A incerteza expandida garantirá que o resultado de medição englobe uma significativa parcela da distribuição dos valores da dispersão do mensurando. A incerteza expandida combinada (Equação 2.34) é obtida pelo produto da incerteza padrão combinada pelo fator de cobertura k_p .

$$U_{c_y} = k_p u_{c_y}. \quad (2.34)$$

2.4 Medição de temperatura em usinagem

A temperatura pode ser considerada como uma das variáveis chaves no estudo do processo de corte de metais. Seus efeitos durante o processo de corte são diversos e podem ser favoráveis ou não. Enquanto indesejados picos de temperatura podem prejudicar a precisão dimensional do corte, o controle adequado da temperatura pode ser útil para garantir dureza à superfície da peça. Nesse cenário, procedimentos para medir a temperatura durante a operação de corte tem sido utilizados por muitos estudos que visam entender os impactos da temperatura na peça, na ferramenta e no processo como um todo (DAVIES *et al.*, 2007).

Conforme Shaw (2005), aproximadamente 90% da energia mecânica converte-se em energia térmica durante a usinagem. Deformação, cisalhamento e atrito estão presentes durante a operação de corte, e boa parte da energia envolvida nesses processos tem ligação com aumento da temperatura da peça e da ferramenta (REZENDE; MAGALHÃES; RUBIO, 2020). Para a ferramenta de corte, tem-se que o seu desgaste está diretamente relacionado com a carga térmica a que é submetida durante a sua atividade (PITTALÀ; MONNO, 2011; SIMEONE; WOOLLEY; RAHIMIFARD, 2015; GAITONDE *et al.*, 2016). Para a peça a ser usinada, a temperatura pode implicar em alterações microestruturais, bem como desvios de formato, dimensão e rugosidade (CHEN *et al.*, 2013; KUCZMASZEWSKI; ZAGÓRSKI, 2013; MEDINA *et al.*, 2017). A carga térmica pode, ainda, acarretar na formação de tensões residuais na superfície usinada (MA *et al.*, 2016; MASMIATI *et al.*, 2016). Dessa forma, nota-se que o monitoramento da temperatura ganha importância nos estudos que visam otimizar a operação de corte (MEDINA *et al.*, 2017; EFIMOVICH; ZOLOTUKHIN, 2020).

Muitas técnicas foram desenvolvidas para a medição de temperatura durante processos de fabricação. De maneira geral, destacam-se o uso de termopares, dispositivos infravermelhos, tintas térmicas, sais fundentes e análise da microestrutura (KOMANDURI; HOU, 2001). O estudo de revisão apresentado por Lauro *et al.* (2014), acerca do monitoramento de sinais (força de corte, vibração, temperatura, som e emissão acústica) durante processos de usinagem, mostrou que as duas primeiras alternativas são as mais relevantes para o monitoramento da temperatura durante o fresamento de metais. A medição de temperatura durante a manufatura de componentes

metálicos é uma tarefa complexa, e o uso medidores por contato, através de termopares, ou sem contato, através da radiação térmica, trás inerentes limitações e dificuldades (LIU *et al.*, 2013).

2.4.1 Termopares

O uso de termopares para medição de temperatura em processos de fresamento pode ser implementado pelo embutimento do sensor na peça a ser usinada ou pela técnica do termopar ferramenta-peça. Yashiro, Ogawa e Sasahara (2013) utilizaram a técnica do termopar ferramenta-peça para medir a temperatura de corte. Para tanto, utilizaram um termopar tipo K durante a etapa de calibração prévia do sistema, estabelecendo uma relação entre força eletromotriz indicada e temperatura. Bagavathiappan *et al.* (2015) mediram a temperatura de peças de liga de alumínio Al6061 e de aço AISI 4340 durante fresamento frontal através de termopares tipo K, diâmetro de 0,5 mm, embutidos em orifícios de 1 mm de diâmetro.

Com o intuito de reduzir o tempo de resposta, Chen *et al.* (2013) utilizaram um termopar não padronizado. Tal dispositivo foi calibrado previamente por comparação com um termopar tipo K e apresentou desvios menores que 1 °C no intervalo de 0 °C a 275 °C. Comparando os resultados experimentais com os valores oriundos de simulações por elementos finitos, os autores concluíram que a temperatura da ferramenta manteve-se cerca de mais de três vezes o valor registrado para a peça. Semelhante constatação foi apresentada por Lima *et al.* (2018) através da comparação dos valores de temperatura obtidos a partir de termopares embutidos e de uma montagem de termopar ferramenta-peça durante o fresamento de amostras de aço AISI D2. Kuczmazewski e Zagórski (2013), em seu estudo sobre medição de temperatura durante fresamento de ligas de magnésio, utilizaram termopar tipo K embutido na peça a ser usinada. A temperatura medida pelo termopar embutido não apresentou variações significativas durante testes de fresamento com profundidade de usinagem de 6 mm e 0,5 mm. Os autores constataram que o uso de termopares faz-se útil apenas para situações de pequenas profundidades de usinagem. Tal condição raramente encontra aplicação industrial.

Os termopares têm como principal vantagem o fato de serem instrumentos de medição de baixa complexidade durante a montagem e a operação, além de apresentarem baixo custo de aquisição e calibração quando comparados com outros medidores de temperatura. Como desvantagens, têm-se o tempo de resposta relativamente alto dos termopares para medição de temperatura durante processo de fresamento e a dificuldade de acessar alguns pontos. Para a técnica do termopar embutido, destaca-se a necessidade de aproximar o termopar o máximo da superfície que se deseja monitorar a temperatura. Quanto maior a distância entre a superfície e o termopar, maiores tenderão a ser os erros de medição, porém limitações físicas impedem a redução dessa distância (YANG *et al.*, 2014). Para a técnica do termopar ferramenta-peça, ressaltam-se a maior complexidade durante a etapa de calibração, por não se tratar de um termopar padrão, e a maior probabilidade de erro devido a gradientes de temperatura e não homogeneidades (CHEN *et al.*, 2013).

2.4.2 Dispositivos IR

A medição de temperatura sem contato durante o processo de corte de metais pode ser realizada através de pirômetros e de termovisores. Enquanto os primeiros permitem mensurar a temperatura de um ponto, os últimos permitem monitorar o perfil de temperatura em uma superfície (DAVIES *et al.*, 2007). Todavia, em ambos os casos, a determinação do valor de emissividade da superfície alvo e o processamento dos sinais captados pelos sensores térmicos são etapas fundamentais para garantir a qualidade do resultado de medição (NICHOLAS; WHITE, 2001).

Medina *et al.* (2017) utilizaram a câmera IR não refrigerada SATIR Hotfind-LXT para monitorar a temperatura durante o fresamento do aço inoxidável AISI 304. Para estimar a emissividade da amostra metálica, utilizaram a comparação do valor de temperatura medido pelo termovisor para uma região da amostra revestida com tinta de emissividade conhecida e uma região sem a cobertura da tinta. Através do ajuste da emissividade, até a temperatura da segunda área coincidir com o valor da primeira, encontrou-se o valor de emissividade igual a 0,921 para a amostra metálica. A partir desse procedimento, tal valor de emissividade foi assumido constante em relação à temperatura e ao espectro.

O uso de revestimento com tinta de emissividade conhecida também foi adotado por Lauro, Brandão e Filho (2013). Os autores monitoraram a temperatura durante o fresamento frontal de amostras da liga Al7050 utilizando um termovisor da fabricante FLIR. Entretanto, os autores posicionaram o termovisor para a face lateral da amostra, a qual apresentaria espessura de 2 mm após o corte. Tal superfície fora pintada com tinta de emissividade conhecida previamente, a fim de evitar a necessidade de medir a emissividade da amostra metálica. Os autores notaram que maiores valores de profundidade de usinagem levaram a variações de maior amplitude na temperatura durante o corte.

Procedimento semelhante foi utilizado por Simeone, Woolley e Rahimifard (2015). Os autores propuseram um aparato experimental para análise do desgaste da ferramenta de corte durante fresamento da liga Al6068 pelo monitoramento da temperatura. Para tanto, utilizaram um termovisor modelo Cedip 450M e garantiram uma área de 11 x 36 pixels na região de interesse. A medição da emissividade da superfície alvo foi realizada pela comparação da medição indicada pela câmera IR e por um termopar tipo K. Ajustou-se a emissividade até que as temperaturas indicadas pelos dois instrumentos fossem iguais. O valor de emissividade da superfície da ferramenta (aço rápido) foi considerado constante e igual a 0,393.

Gaitonde *et al.* (2016) analisaram a temperatura máxima durante a usinagem do aço AISI D2 através de uma câmera IR modelo Raytek MM associada a um sistema de aquisição de dados. Os autores detectaram maior temperatura para condição de corte de maior profundidade de usinagem, maior velocidade de corte e avanço por dente intermediário. Cui *et al.* (2017) utilizaram o termovisor Fluke Ti400, modelo LWIR com detectores não refrigerados de 320 x 240 pixels, para medir a temperatura de fresamento da liga de titânio Ti_6Al_4V . Os autores utilizaram o valor de emissividade constante e igual a 0,25, obtido a partir da literatura científica.

Maior atenção aos fatores que influenciam a emissividade foi dada por Valiorgue *et al.* (2013). Os autores utilizaram uma câmera IR da fabricante FLIR, resolução de 320 x 256 pixels e banda espectral de 3,4 μm a 5 μm , para monitorar a usinagem do aço inoxidável 316L. Os autores realizaram testes para medir a emissividade normal e total na banda de operação do termovisor. A amostra metálica foi aquecida em um forno, sob atmosfera neutra (nitrogênio), e teve sua temperatura medida por um termopar e a radiação emitida medida pelo termovisor. A partir de tais grandezas, os autores estimaram a emissividade normal e total como função da temperatura no intervalo de 50 °C a 550 °C.

Método similar foi aplicado por Yang *et al.* (2014) para posterior medição da temperatura de fresamento do aço AISI 1045. A emissividade da amostra metálica foi estimada utilizando um aparato composto por um forno elétrico, um termopar e um pirômetro. A emissividade foi obtida a partir do ajuste da temperatura medida pelos dois instrumentos e o procedimento foi repetido para cinco pontos no intervalo de temperatura de 327,8 °C a 709,1 °C. Tal técnica também foi empregada no estudo do fresamento de frontal da liga de titânio Ti₆Al₄V por Pittalà e Monno (2011).

A consideração da dependência da emissividade em relação à temperatura também foi feita por Bagavathiappan *et al.* (2015) na medição da temperatura durante fresamento da liga de alumínio Al6061 e de aço AISI 4340 utilizando o termovisor Agema Thermovision-550 (detectores não refrigerados de 320 x 240 pixels e banda espectral de 3,6 μm a 5 μm). Os autores realizaram a medição da emissividade através da comparação do valor de temperatura medido pela câmera IR para uma região com revestimento de tinta de emissividade conhecida e uma região sem o revestimento. O procedimento foi repetido para temperaturas com intervalos de 10 °C.

Percebe-se que a temperatura é uma grandeza de suma importância durante o processo de corte de metais e que o seu monitoramento é descrito de variadas maneiras na literatura científica. O uso de dispositivos infravermelhos traz a possibilidade de medição de perfis de temperatura e de medições com menor tempo de resposta, limitações que os medidores de contato mais convencionais (termopares) enfrentam. Todavia, existem dificuldades inerentes à termometria baseada no espectro infravermelho, notadamente no que diz respeito ao processamento dos sinais radiométricos e na determinação dos valores adequados de emissividade. Conforme observado na revisão bibliográfica acerca de monitoramento de temperatura durante fresamento de metais, tais complicadores são, na maioria das vezes, negligenciados.

3 Metodologia

A metodologia do presente trabalho dividiu-se em três partes. Primeiramente, mediu-se a emissividade da superfície metálica em estudo. Posteriormente, estimou-se a temperatura da peça metálica durante o processo de fresamento frontal mediante uso de um termovisor LWIR e dos valores previamente obtidos para a emissividade. Por fim, foi realizada a análise de incertezas das medições efetuadas nas etapas anteriores. As fichas técnicas dos equipamentos e instrumentos utilizados no presente trabalho são apresentadas no Apêndice A.

3.1 Estimativa de emissividade espectral

O procedimento de medição da emissividade espectral envolveu dois estágios. No primeiro estágio foram realizados testes experimentais e coletados dados de temperatura, radiação térmica e condições ambientes. No segundo estágio, os dados experimentais foram aplicados em uma rotina de pós-processamento, baseada em equações de transferência de calor por radiação direcional espectral e implementada em Python.

3.1.1 Montagem experimental

O metal escolhido para ser utilizado durante os experimentos do presente trabalho foi o aço AISI H13 no estado recozido (dureza média de 178 HV). Trata-se de um aço ferramenta alta liga normalmente utilizado para trabalhos a quente. Amostras deste aço foram utilizadas para a etapa de estimação da emissividade de sua superfície. A Tabela 1 apresenta os principais elementos da composição química da amostra do aço utilizada, bem como os limites definidos em norma. A composição química da amostra metálica foi obtida a partir de ensaio por espectrometria ótica, conforme relatório apresentado no Anexo A

Tabela 1 – Composição química, em percentual de massa (*wt%*), dos principais elementos^[1] da amostra de aço AISI H13 e os limites estabelecidos por norma^[2].

	C	Mn	Si	Cr	V	Mo
Amostra	0,35	0,31	0,95	4,89	0,85	1,17
Norma ^[2]	0,32 - 0,45	0,20 - 0,60	0,80 - 1,25	4,75 - 5,50	0,80 - 1,20	1,10 - 1,75

^[1] Percentual de ferro e demais elementos pode ser obtido pelo balanço.

^[2] (ASTM, 2007).

A amostra metálica utilizada apresentava formato paralelepípedo, com faces retangulares de dimensões 105 mm x 20 mm x 16 mm. Em uma das faces 105 mm x 20 mm (doravante denominada superfície superior da amostra), fez-se um furo de diâmetro de 3 mm e profundidade de 8 mm. Esta face recebeu acabamento realizado por fresamento. Sua rugosidade foi medida com auxílio do medidor de rugosidade Taylor Hobson Surtronic 25. O desvio aritmético médio

do perfil de rugosidade (R_a) da superfície com o furo foi igual a $0,37 \mu m$. Conforme exposto na Seção 2.2.3, superfícies reais tendem ao comportamento opticamente suave à medida que a razão entre o comprimento de onda da radiação e a rugosidade da superfície é maior que 1. O valor de rugosidade de $0,37 \mu m$ garante, na banda LWIR, razão mínima de aproximadamente 20. A Figura 6 apresenta uma fotografia do corpo de prova utilizado nos ensaios de medição de emissividade.



Figura 6 – Fotografia do corpo de prova utilizado nos ensaios de medição de emissividade. Material: aço AISI H13. Dimensões: 105 mm x 20 mm x 16 mm. Destaque para a superfície superior contendo furo de diâmetro de 3 mm e profundidade de 8 mm.

Durante os testes de medição da emissividade, realizaram-se as medições do fluxo de calor por radiação e da temperatura da superfície da amostra metálica. Todos os testes foram realizados em espaço climatizado, sob condições ambientes monitoradas. Para tanto, um termohigrômetro digital, modelo Testo 622, foi utilizado para monitorar a temperatura ambiente (T_{amb}) e a umidade relativa ambiente ($\varphi\%$). A temperatura ambiente manteve-se entre $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e $24 \text{ }^\circ\text{C}$, enquanto a umidade relativa variou de 45% a 70%.

A temperatura da amostra de aço AISI H13 foi medida utilizando um termopar tipo T associado a um sistema de aquisição de dados NI 9211 Series C, fabricado pela *National Instruments* e utilizado para leitura da força eletromotriz gerada pelo termopar. O termopar foi previamente calibrado seguindo as recomendações da ITS-90 (BIPM, 1997; ASTM, 2019). A Figura 7 apresenta uma representação esquemática da montagem experimental utilizada para calibração do termopar tipo T. A calibração foi realizada por comparação com uma termorresistência PT-100, utilizada como termômetro de referência, em fornos de calibração modelos Ecil BT e Ecil AT. A leitura da temperatura medida pelo PT-100 foi realizada utilizando um sistema de aquisição de dados Agilent 34970A. O procedimento foi executado para temperaturas de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ a $250 \text{ }^\circ\text{C}$, utilizando sete pontos de calibração: $50 \text{ }^\circ\text{C}$, $75 \text{ }^\circ\text{C}$, $100 \text{ }^\circ\text{C}$, $125 \text{ }^\circ\text{C}$, $150 \text{ }^\circ\text{C}$, $200 \text{ }^\circ\text{C}$, $250 \text{ }^\circ\text{C}$. O Apêndice B apresenta os resultados obtidos para cada ponto de calibração.

Para medição do fluxo de calor por radiação, utilizou-se o termovisor FLIR SC660 associado com lentes de distância focal de 19 mm. Trata-se de um termovisor LWIR de sensores microbolométricos não refrigerados, que apresenta resolução de 640×480 pixels e intervalo espectral de operação de $7,5 \mu m$ até $13 \mu m$. As lentes de distância focal de 19 mm garantem campo de visão de $45^\circ \times 34^\circ$.

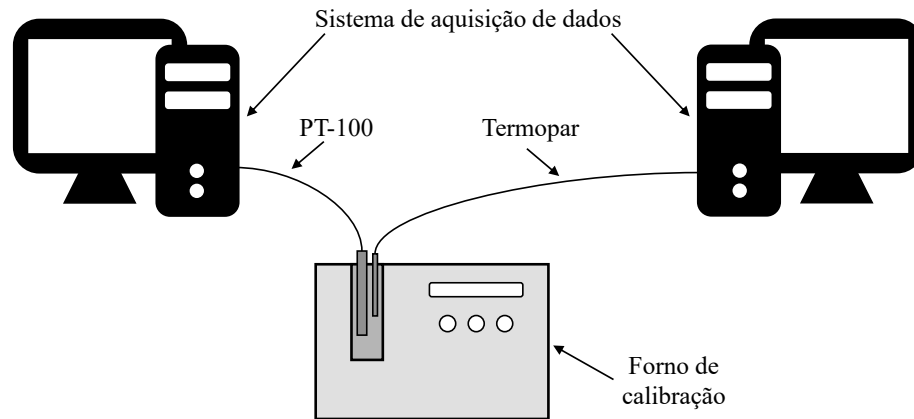


Figura 7 – Montagem experimental para calibração do termopar tipo T. Termorresistência PT-100 utilizada como termômetro de referência.

Durante os testes para medição da emissividade da superfície do aço AISI H13, as amostras foram manuseadas cuidadosamente, de modo a evitar a ocorrência de qualquer dano a sua superfície superior, a qual seria inspecionada posteriormente. A superfície superior da amostra foi limpa utilizando álcool e acetona, a fim de retirar qualquer impureza que pudesse estar presente. Após a limpeza, a amostra foi direcionada para um forno tipo mufla, onde ela foi aquecida até a temperatura desejada para o ensaio. Então, a amostra aquecida foi retirada e levada para uma caixa de madeira MDF, a qual havia sido previamente preenchida com material isolante (lã de rocha). A amostra aquecida foi posicionada sobre a camada de lã de rocha, de modo que apenas a sua face superior ficasse exposta. Neste momento, posicionou-se o termopar tipo T no furo da superfície da amostra e iniciou-se o registro das medições do termopar, por meio do sistema de aquisição de dados NI 9211 Series C, a uma taxa de 10 Hz. Simultaneamente, o termovisor FLIR SC660, previamente posicionado, teve seu foco ajustado para a área ao redor do furo onde o termopar fora posicionado e iniciou-se a aquisição de termogramas de resposta plena ($\varepsilon = 1$ e $d = 0$) a uma taxa de 1 Hz.

A Figura 8 apresenta uma representação simbólica da montagem experimental para medição da emissividade da superfície da amostra metálica e uma fotografia da montagem momentos antes do início dos procedimentos experimentais. O termovisor foi posicionado inclinadamente, de forma que fosse medida a radiação proveniente da superfície da amostra a um ângulo de zênite de 37° . Tal inclinação foi escolhida devido a limitações para a alocação do termovisor nos experimentos da etapa de medição da temperatura da peça metálica durante fresamento, conforme será apresentado na Seção 3.2.1. O posicionamento do termovisor foi ajustado utilizando um goniômetro digital. A distância entre o termovisor e a amostra, medida utilizando uma trena milimetrada, foi de 240 mm. O IFOV do termovisor utilizado foi de aproximadamente 1,3 mrad, de modo que garantiu-se a visualização de áreas de até $0,9 \text{ mm}^2$. Este procedimento experimental foi repetido para oito valores de temperatura da amostra diferentes no intervalo de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ a $250 \text{ }^\circ\text{C}$.

A Figura 9 apresenta a visão do termovisor, no espectro infravermelho e no espectro do

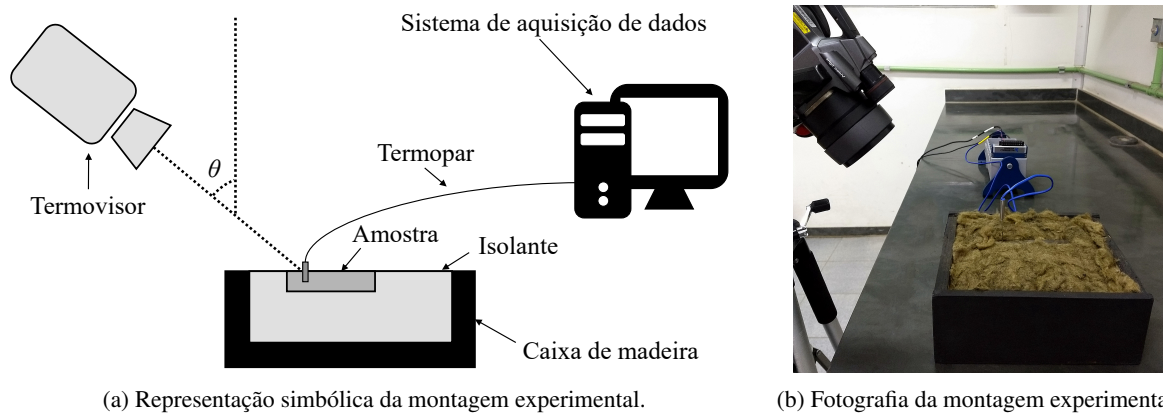


Figura 8 – Montagem experimental para obtenção dos termogramas de resposta plena da amostra metálica aquecida.

visível, em um dos oito testes realizados. O termograma foi obtido utilizando $\varepsilon = 1$ e $d = 0$, isto é, trata-se de um termograma de resposta plena e as temperaturas indicadas nele não correspondem às reais temperaturas termodinâmicas dos objetos.

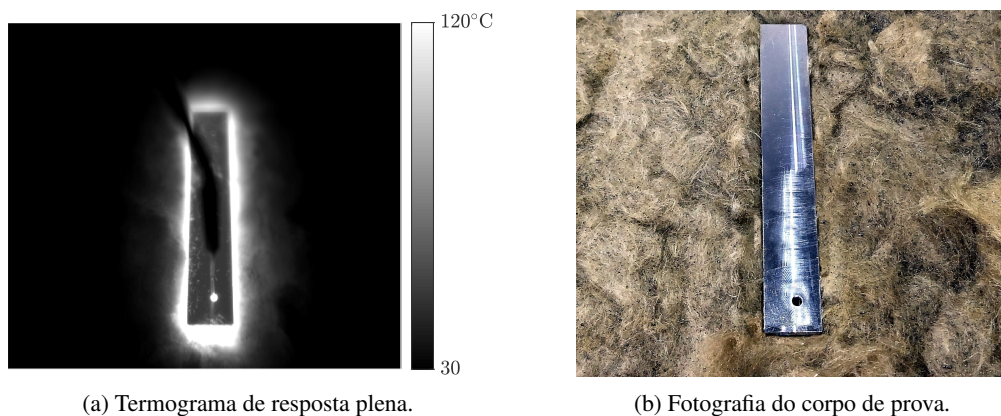


Figura 9 – Amostra metálica durante os experimentos para medição da emissividade espectral. Valores de temperatura indicados se referem à temperatura de resposta plena e, portanto, não representam a temperatura termodinâmica da amostra.

3.1.2 Rotina de pós-processamento

As Equações 2.23, 2.24 e 2.25 podem ser utilizadas para calcular a emissividade direcional espectral de uma superfície metálica a partir de sua resistividade elétrica. A rotina de pós-processamento proposta no presente trabalho visa obter a emissividade espectral e a resistividade elétrica de uma superfície metálica. Entretanto, a resistividade elétrica é uma das variáveis de entrada do modelo apresentado na Seção 2.2.3. Logo, o pós-processamento valeu-se de uma rotina iterativa para estimar a resistividade elétrica e a emissividade espectral da superfície metálica. Para tanto, baseou-se no balanço dos sinais processados pelo termovisor, os quais, conforme apresentado na Figura 4, provém de três diferentes fontes.

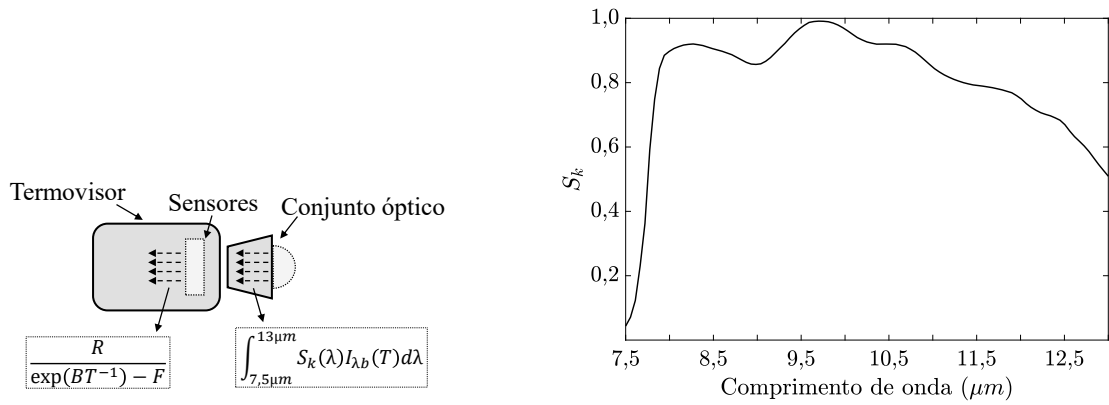
O termovisor recebe radiação oriunda de três diferentes fontes e as combina em um único sinal, chamado *full response* ou sinal pleno (MINKINA; DUDZIK, 2009; VOLLMER;

MÖLLMANN, 2018). O sinal pleno S_{full} pode ser obtido definindo no termovisor $\varepsilon = 1$ e $d = 0$ e obtendo a temperatura de resposta plena T_{full} . A Equação 3.1 calcula S_{full} a partir de T_{full} .

$$S_{full} = \int_{7,5 \mu m}^{13 \mu m} \varsigma(T_{full}) S_k(\lambda) I_{\lambda b}(T_{full}) d\lambda. \quad (3.1)$$

A função $\varsigma(T)$ se refere a função de conversão do sinal radiométrico obtido pelo termovisor em sinal eletrônico processado. Tal como apresentado na Equação 3.2 e ilustrado na Figura 10, $\varsigma(T)$ é obtido a partir da equação de calibração da câmera IR (FERREIRA *et al.*, 2019b). O símbolo S_k representa a sensibilidade espectral do termovisor, uma grandeza intrínseca ao conjunto câmera-lente. Para o termovisor FLIR SC660 operando com lentes de distância focal 19 mm, tem-se que a sensibilidade espectral tem o comportamento descrito pela Figura 10.

$$\varsigma(T) = \frac{R}{\exp(BT^{-1}) - F} \left(\int_{7,5 \mu m}^{13 \mu m} S_k(\lambda) I_{\lambda b}(T) d\lambda \right)^{-1}. \quad (3.2)$$



(a) Representação esquemática da conceituação da função conversão de sinal $\varsigma(T)$. (b) Sensibilidade espectral relativa do termovisor FLIR SC660 com lentes de 19 mm.

Figura 10 – Processamento do sinal radiométrico realizado pelo termovisor.

O sinal pleno é composto por três parcelas, cada uma delas referindo-se a uma das três fontes de radiação que o termovisor capta. Tal como apresentado em Ferreira *et al.* (2019b), o sinal associado à radiação emitida pelo objeto alvo $S_{ob,\lambda}$ pode ser calculado levando em consideração a emissividade espectral da superfície e a transmissividade da atmosfera existente entre o termovisor e o objeto alvo. A Equação 3.3 calcula o sinal eletrônico associado a parcela radiométrica referente à emissão da superfície.

$$S_{ob,\lambda} = \varsigma(T_{ob}) S_k(\lambda) \tau_{atm} \varepsilon_{\lambda}(T_{ob}) I_{\lambda b}(T_{ob}). \quad (3.3)$$

A parcela referente à radiação emitida pela vizinhança e refletida pela superfície do objeto em direção ao termovisor, chamada de sinal refletido $S_{ref,\lambda}$, foi definida a partir da Equação 3.4. Assumiu-se a temperatura refletida T_{ref} igual a temperatura ambiente T_{amb} e a emissividade da vizinhança igual a 1.

$$S_{ref,\lambda} = \varsigma(T_{amb}) S_k(\lambda) \tau_{atm} \rho_{\lambda}(T_{ob}) I_{\lambda b}(T_{amb}). \quad (3.4)$$

A terceira componente do sinal pleno, $S_{atm,\lambda}$, relaciona-se com a radiação emitida pela coluna de ar existente entre o termovisor e o objeto. Assumiu-se a temperatura da atmosfera baixa igual à temperatura ambiente T_{amb} e a sua emissividade igual a $1 - \tau_{atm}$. Desse modo, a Equação 3.5 define o sinal $S_{atm,\lambda}$.

$$S_{atm,\lambda} = \varsigma(T_{amb})S_k(\lambda) (1 - \tau_{atm}) I_{\lambda b}(T_{amb}). \quad (3.5)$$

A rotina de pós-processamento teve caráter iterativo, baseado no balanço dos sinais no termovisor, isto é, a soma dos sinais referentes à emissão do objeto, à reflexão do objeto e à emissão da atmosfera deve ser igual ao sinal pleno capturado pela câmera. Esta igualdade é válida para nível espectral e, conseqüentemente, para os sinais integrados na banda espectral de operação do termovisor. Dessa forma, propôs-se a Equação 3.6 como critério de convergência para a rotina iterativa de pós-processamento, na qual o critério de parada apresenta um desvio máximo aceitável de 0,01% do sinal pleno S_{full} . As integrais numéricas foram realizadas discretizando a banda espectral de $7,5 \mu m$ a $13 \mu m$ em intervalos de $0,01 \mu m$.

$$\left| S_{full} - \left(\sum_{7,5\mu m}^{13\mu m} S_{ob,\lambda} \Delta\lambda + \sum_{7,5\mu m}^{13\mu m} S_{ref,\lambda} \Delta\lambda + \sum_{7,5\mu m}^{13\mu m} S_{atm,\lambda} \Delta\lambda \right) \right| < 0,01\%. \quad (3.6)$$

O sistema de equações estabelecidos apresenta número de equações e de variáveis desconhecidas iguais. Para solucioná-lo, foi necessário aplicar um valor inicial de resistividade elétrica para a temperatura de referência na Equação 2.27. Assumiu-se a temperatura de referência (T_o) igual a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e valor inicial para resistência elétrica de referência (r_o) igual a $1 \cdot 10^{-5} \Omega cm$, com incrementos (Δr_o) de $1 \cdot 10^{-7} \Omega cm$. O valor de γ_o utilizado foi de $0,000886 \text{ K}^{-1}$ e foi obtido a partir da Equação 3.7, para ΔT tendendo a zero, e dos valores de resistividade elétrica apresentados por Rosales-Saiz *et al.* (2016) para o aço AISI H13.

$$\gamma_o = \frac{1}{(T_o + \Delta T)} \ln \left(\frac{r(T_o + \Delta T)}{r(T_o)} \right). \quad (3.7)$$

A rotina de pós-processamento tem como variáveis de saída a resistividade elétrica que fez o sistema convergir e os valores de emissividade espectral associados. A rotina foi utilizada para os oito conjuntos de variáveis de entrada oriundos dos testes experimentais. Os valores de emissividade espectral foram armazenados e agrupados em uma matriz de emissividades $[\varepsilon_\lambda]$. Ao final dos oito testes, a matriz de emissividades apresentava os valores de emissividade espectral estimados para as oito temperaturas no intervalo de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ a $250 \text{ }^\circ\text{C}$, com cada linha da matriz associada a um valor de comprimento de onda (de $7,5 \mu m$ a $13 \mu m$ com incrementos de $0,01 \mu m$, totalizando 551 linhas) e cada coluna associada a um valor de temperatura da amostra de aço AISI H13 (totalizando 8 colunas).

O diagrama apresentado na Figura 11 ilustra o processo de pós-processamento dos dados para estimação dos valores de emissividade espectral da amostra metálica para as oito temperatura testadas.

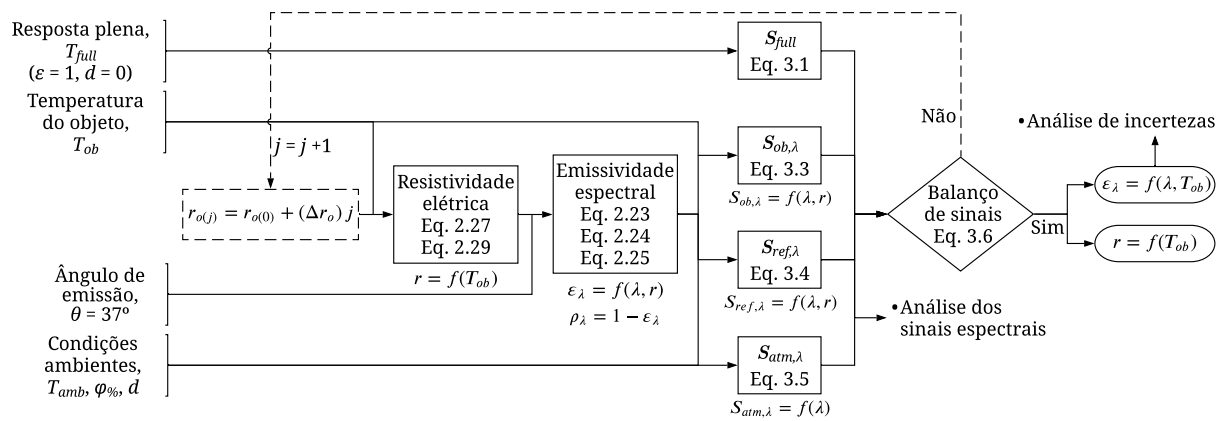


Figura 11 – Diagrama do modelo matemático utilizado para estimar a emissividade espectral de metais.

3.2 Estimativa da temperatura da peça metálica em fresamento

O procedimento de estimação da temperatura da peça metálica durante fresamento frontal utilizando termovisores LWIR envolveu dois estágios. No primeiro estágio foram realizados ensaios termográficos durante o fresamento frontal de amostras do aço AISI H13. Os termogramas foram armazenados e as informações extraídas deles foram utilizadas no segundo estágio, no qual os dados experimentais foram aplicados em uma rotina de pós-processamento semelhante àquela utilizada para estimar a emissividade espectral da superfície metálica.

3.2.1 Montagem experimental

Os testes de fresamento frontal das amostras de aço AISI H13 foram realizados com o centro de usinagem ROMI Discovery 560 e uma fresa de 50 mm de diâmetro e 3 dentes. Foram efetuados doze testes, cada um deles com condições de corte diferentes dos demais. Os parâmetros de corte modificados entre os testes foram: velocidade de corte (v_c), avanço por dente (f_z), profundidade de corte (a_p) e material da ferramenta de corte. Todos os testes foram realizados sob condições de corte a seco. A Tabela 2 apresenta as doze condições de corte testadas.

Durante a execução dos testes, as condições ambientes foram monitoradas e registradas. Para tanto, utilizou-se o termo-higrômetro Testo 622. A temperatura ambiente manteve-se entre 20,5 °C e 21,2 °C, enquanto a umidade relativa variou de 55% a 65%. O conjunto câmera IR e lente utilizado foi o mesmo empregado na etapa de medição da emissividade. O termovisor foi posicionado sob o mesmo ângulo de zênite utilizado na etapa experimental da Seção 3.1.1 ($\theta = 37^\circ$). Este ângulo de zênite foi escolhido por ser a menor inclinação praticável dentro do centro de usinagem. A distância até o objeto alvo foi de 260 mm (menor área inspecionável 1 mm²). Programou-se o termovisor para que fossem registrados termogramas de resposta plena ($\epsilon = 1$ e $d = 0$) com frequência de 15 Hz. O foco do termovisor foi ajustado para a região de interesse, a qual foi estabelecida como sendo a área de contato entre a ferramenta de corte e a peça de aço AISI H13.

Tabela 2 – Condições de corte de cada um dos doze testes de fresamento realizados.

Teste	v_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)	Ferramenta	R_a (μm)
1	200	0,15	0,5	Metal duro	0,40
2	200	0,05	1,5	Metal duro	0,21
3	150	0,10	1,0	Metal duro	0,25
4	100	0,15	1,5	Metal duro	0,31
5	100	0,05	1,5	Metal duro	0,15
6	100	0,05	0,5	Metal duro	0,17
7	200	0,15	0,5	Cermet	0,37
8	200	0,05	1,5	Cermet	0,14
9	150	0,10	1,0	Cermet	0,23
10	100	0,15	1,5	Cermet	0,29
11	100	0,05	1,5	Cermet	0,17
12	100	0,05	0,5	Cermet	0,10

A Figura 12 apresenta uma representação simbólica e uma fotografia da montagem experimental utilizada durante os testes de fresamento frontal da amostra de aço AISI H13. A Figura 13 contém um termograma para cada um dos doze testes realizados. Trata-se de termogramas de resposta plena que apresentam valores de temperatura aparente (T_{full}), portanto não representam a real temperatura dos objetos.

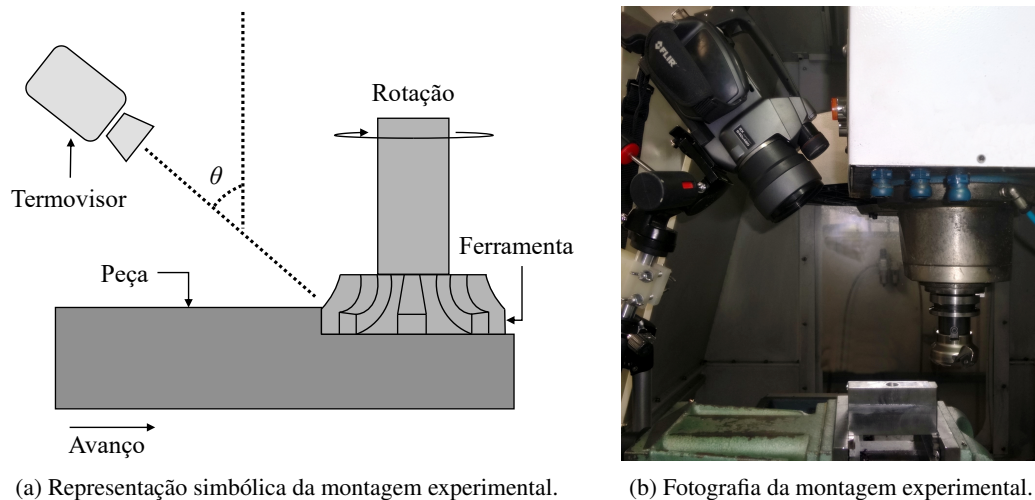


Figura 12 – Montagem experimental para obtenção dos termogramas de resposta plena durante o fresamento frontal.

Após a execução dos doze testes, foi realizada a seleção dos termogramas que seriam utilizados nas etapas posteriores do trabalho. Selecionaram-se nove termogramas para cada um dos doze testes. A seleção dos termogramas teve como critério obrigatório a boa visibilidade da área de contato entre a ferramenta de corte e a peça de aço AISI H13. Dessa forma, priorizaram-se termogramas que não apresentavam cavacos no campo de visão do termovisor. Os termogramas referentes ao início e ao final do movimento de corte foram rejeitados.

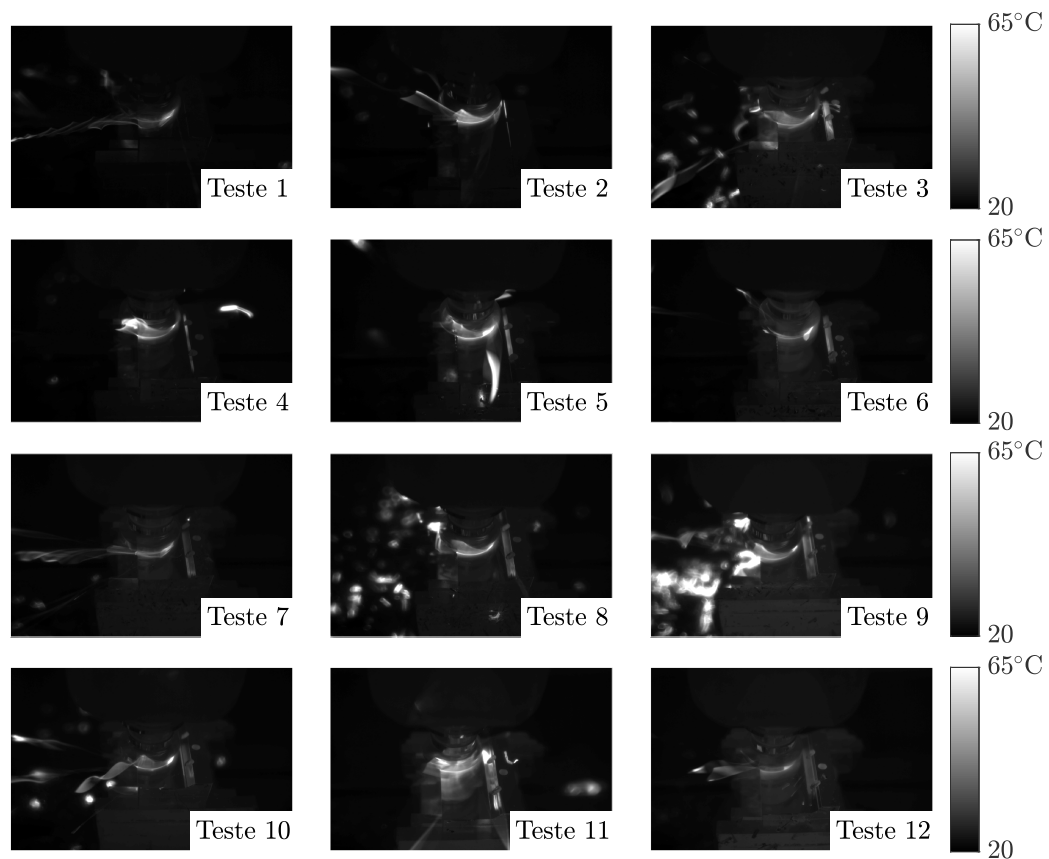


Figura 13 – Termogramas de resposta plena referentes a cada um dos doze testes de fresamento frontal realizados. Os valores de temperatura indicados são anteriores ao uso da rotina de pós-processamento e, portanto, não indicam a temperatura termodinâmica da peça.

3.2.2 Rotina de pós-processamento

A rotina de pós-processamento para estimação da temperatura da peça de aço AISI H13 durante o fresamento frontal utiliza as equações apresentadas na Seção 3.1.2 e cinco variáveis de entrada: matriz de emissividades, temperatura de resposta plena, temperatura ambiente, umidade relativa e distância. A primeira variável de entrada, $[\varepsilon_\lambda]$, proveio dos resultados da rotina de pós-processamento para medição da emissividade da superfície metálica em estudo. A montagem experimental descrita na Seção 3.2.1 forneceu as demais quatro variáveis de entrada. A grandeza a ser definida era a própria temperatura do objeto (T_{ob}).

Os nove termogramas de resposta plena pré-selecionados para cada teste de fresamento frontal foram utilizados para obter cada uma das doze temperaturas de resposta plena (T_{full}). Com auxílio do software disponibilizado pela fabricante da câmera IR, FLIR Tools, foram dispostos nove pontos na região de interesse de cada termograma, totalizando 81 pontos para cada teste realizado. A temperatura de resposta plena T_{full} foi, então, calculada pela média dos 81 valores de temperatura associados aos 81 pontos dispostos na região da área de contato entre a ferramenta de corte e a peça nos termogramas de resposta plena pré-selecionados.

A rotina para estimar a temperatura da peça durante o fresamento, ilustrada pelo diagrama apresentado na Figura 14, baseou-se no cálculo dos sinais processados pelo termovisor (Equações

3.1, 3.3, 3.4 e 3.5) e teve comportamento iterativo. O critério de parada baseou-se no balanço dos sinais S_{full} , $S_{ob,\lambda}$, $S_{ref,\lambda}$ e $S_{atm,\lambda}$, conforme Equação 3.6. Para tanto, aplicou-se um valor inicial de $T_{ob(0)}$ igual a 50 °C, com incrementos (ΔT_{ob}) de 0,01 °C até o momento em que o balanço dos sinais no termovisor fosse satisfeito, isto é, apresentasse desvio menor que 0,01% do sinal de resposta plena. A rotina foi executada para os 81 valores de temperatura de resposta plena de cada teste, obtidos a partir dos termogramas pré-selecionados. Posteriormente, executou-se o pós-processamento para os doze valores médios de T_{full} .

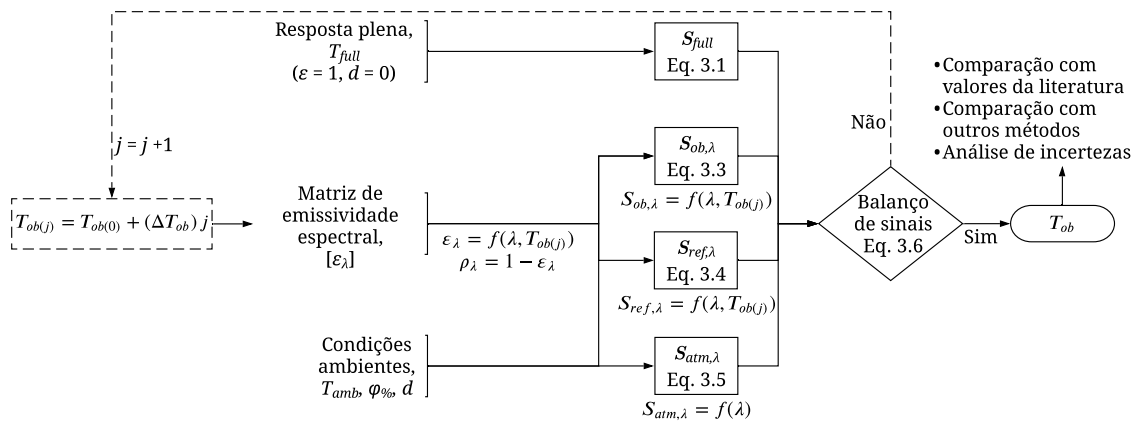


Figura 14 – Diagrama do modelo matemático utilizado para estimar a temperatura da peça metálica durante o fresamento frontal.

3.3 Análise de incertezas

A análise de incertezas das medições realizadas no presente estudo baseou-se no método do GUM (JCGM, 2008). Para calcular a propagação de incertezas, definiram-se os valores de incerteza padrão de cada uma das variáveis de entrada durante o processo de estimação da emissividade do aço AISI H13 e, posteriormente, da temperatura da peça de mesmo material durante o fresamento frontal. Todas as incertezas foram analisadas como incertezas tipo B neste trabalho. Para tanto, foram utilizadas informações obtidas com os fabricantes dos instrumentos de medição empregados nos experimentos e assumiu-se distribuição uniforme para estimar a incerteza padrão de maneira conservadora. A incerteza padrão combinada foi convertida em incerteza expandida combinada aplicando a Equação 2.34. O fator de cobertura k_p utilizado foi igual a 2, de modo a garantir nível de confiança de 95% (MINKINA; DUDZIK, 2009).

3.3.1 Incerteza na estimativa da emissividade espectral

A Equação 3.8 apresenta a relação entre as seis variáveis de entrada e a variável de saída durante o processo para estimar a emissividade da superfície metálica. A Tabela 3 apresenta as informações relevantes sobre as variáveis de entrada para o cálculo da propagação de incertezas e definição da incerteza combinada da emissividade.

$$\varepsilon_\lambda = f(T_{full}, T_{ob}, T_{amb}, \varphi\%, d, \theta). \quad (3.8)$$

Tabela 3 – Incerteza das variáveis de entrada do cálculo de emissividade espectral.

Fonte		Instrumento	Incerteza	Distribuição
Temperatura aparente	$u_{T_{full}}$	Termovisor	2 °C ou 2%	Uniforme $\sqrt{3}$
Temperatura da amostra	$u_{T_{ob}}$	Termopar	1 °C ou 0,75% ^[1]	Uniforme $\sqrt{3}$
Temperatura ambiente	$u_{T_{amb}}$	Termo-higrômetro	0,4 °C	Uniforme $\sqrt{3}$
Umidade relativa	$u_{\varphi\%}$	Termo-higrômetro	3%	Uniforme $\sqrt{3}$
Distância	u_d	Trena milimetrada	1 mm	Triangular $\sqrt{6}$
Ângulo de emissão	u_θ	Goniômetro	0,1°	Triangular $\sqrt{6}$

^[1](ASTM, 2017)

Calculou-se os coeficientes de sensibilidade da emissividade espectral em relação a cada uma das seis variáveis de entrada. Para tanto, as derivadas parciais, conforme Equação 2.32, foram resolvidas numericamente. Para calcular a incerteza padrão combinada da emissividade, utilizaram-se os valores de incerteza padrão obtidos a partir das informações da Tabela 3 e os valores de coeficiente de sensibilidade calculados. Durante o cálculo, considerou-se as variáveis de entrada como não correlacionadas. A Equação 2.33 foi, então, reescrita na forma da Equação 3.9.

$$u_{c\varepsilon_\lambda}^2 = \left[u_{T_{full}} \frac{\partial \varepsilon_\lambda}{\partial T_{full}} \right]^2 + \left[u_{T_{ob}} \frac{\partial \varepsilon_\lambda}{\partial T_{ob}} \right]^2 + \left[u_{T_{amb}} \frac{\partial \varepsilon_\lambda}{\partial T_{amb}} \right]^2 + \left[u_{\varphi\%} \frac{\partial \varepsilon_\lambda}{\partial \varphi\%} \right]^2 + \left[u_d \frac{\partial \varepsilon_\lambda}{\partial d} \right]^2 + \left[u_\theta \frac{\partial \varepsilon_\lambda}{\partial \theta} \right]^2. \quad (3.9)$$

3.3.2 Incerteza na estimativa da temperatura da peça

A Equação 3.10 apresenta a relação entre as cinco variáveis de entrada e a variável de saída durante o processo para estimar a temperatura da superfície da peça de aço AISI H13 durante o fresamento frontal. A Tabela 4 apresenta as informações relevantes sobre as variáveis de entrada para o cálculo da propagação de incertezas e definição da incerteza combinada da estimativa da temperatura da peça. O valor de incerteza da variável de entrada emissividade espectral (U_{ε_λ}) proveio dos cálculos descritos na Seção 3.3.1.

$$T_{ob} = f(\varepsilon_\lambda, T_{full}, T_{amb}, \varphi\%, d). \quad (3.10)$$

De maneira semelhante ao apresentado no cálculo da incerteza padrão combinada da emissividade espectral, calculou-se os coeficientes de sensibilidade da temperatura da peça em relação a cada uma das cinco variáveis de entrada. As derivadas parciais, conforme Equação 2.32, foram trabalhadas numericamente. Os valores de coeficiente de sensibilidade e os valores de incerteza padrão, obtidos a partir das informações da Tabela 4, foram aplicados para calcular a incerteza padrão combinada da temperatura da peça. Assumiu-se as variáveis de entrada

Tabela 4 – Incerteza das variáveis de entrada do cálculo da temperatura da peça durante o fresamento.

Fonte		Instrumento	Incerteza	Distribuição	
Emissividade espectral	u_{ε_λ}	Pós-processamento	U_{ε_λ}	Normal	2
Temperatura aparente	$u_{T_{full}}$	Termovisor	2 °C ou 2%	Uniforme	$\sqrt{3}$
Temperatura ambiente	$u_{T_{amb}}$	Termo-higrômetro	0,4 °C	Uniforme	$\sqrt{3}$
Umidade relativa	$u_{\varphi\%}$	Termo-higrômetro	3%	Uniforme	$\sqrt{3}$
Distância	u_d	Trena milimetrada	1 mm	Triangular	$\sqrt{6}$

como não correlacionadas, de modo que o cálculo da incerteza padrão combinada foi realizado reescrevendo a Equação 2.33 na forma da Equação 3.11.

$$u_{cT_{ob}}^2 = \left[u_{\varepsilon_\lambda} \frac{\partial T_{ob}}{\partial \varepsilon_\lambda} \right]^2 + \left[u_{T_{full}} \frac{\partial T_{ob}}{\partial T_{full}} \right]^2 + \left[u_{T_{amb}} \frac{\partial T_{ob}}{\partial T_{amb}} \right]^2 + \left[u_{\varphi\%} \frac{\partial T_{ob}}{\partial \varphi\%} \right]^2 + \left[u_d \frac{\partial T_{ob}}{\partial d} \right]^2. \quad (3.11)$$

4 Resultados

A emissividade espectral das amostras do aço AISI H13 foi estimada para oito temperaturas diferentes e tais valores foram aplicados para a medição da temperatura de peças do mesmo material durante fresamento frontal sob doze condições de corte distintas. Os resultados obtidos são apresentados nesta seção, a qual divide-se em três subseções. Primeiramente, os valores de emissividade espectral encontrados são apresentados. Uma análise dos sinais processados pelo termovisor é apresentada na segunda subseção. Por fim, a última subseção contém as estimativas de temperatura da peça durante fresamento frontal para cada uma das doze condições de corte.

4.1 Estimativas de emissividade espectral

A emissividade espectral das amostras de aço AISI H13 foi estimada para oito temperaturas diferentes, no intervalo de $7,5 \mu m$ até $13 \mu m$. As temperaturas testadas foram: $67 \text{ }^\circ\text{C}$, $121 \text{ }^\circ\text{C}$, $132 \text{ }^\circ\text{C}$, $139 \text{ }^\circ\text{C}$, $162 \text{ }^\circ\text{C}$, $192 \text{ }^\circ\text{C}$, $221 \text{ }^\circ\text{C}$ e $242 \text{ }^\circ\text{C}$. As estimativas de emissividade espectral obtidas variaram de 0,12 a 0,20. Os valores foram tanto menores quanto maiores os comprimentos de onda e menores as temperaturas da amostra, o que foi uma consequência do modelo matemático adotado. A Figura 15 traz os valores de emissividade espectral, no intervalo de $7,5 \mu m$ até $13 \mu m$, obtidos para as oito temperaturas testadas. Poucos estudos estimaram a emissividade do aço AISI H13, espectralmente ou não. Wen (2010) encontrou valores de emissividade espectral menores que 0,3 para amostras a 700 K e intervalo espectral de $2,8 \mu m$ a $4,2 \mu m$. Os resultados da presente pesquisa encontram-se dentro do esperado em relação ao indicado por Wen (2010).

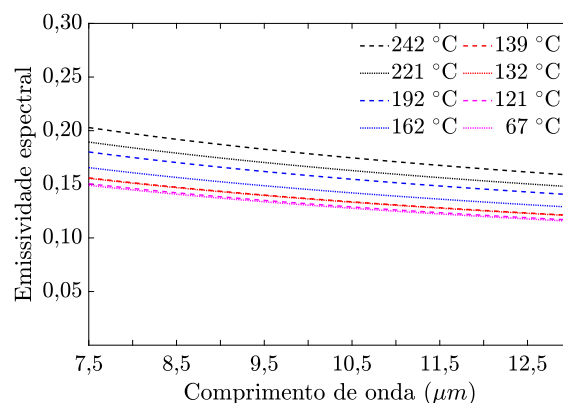


Figura 15 – Resultados de emissividade espectral, no intervalo LWIR, da amostra de aço AISI H13 para as oito temperaturas do objeto testadas.

A Figura 16 apresenta as estimativas de emissividade espectral com suas respectivas incertezas expandidas. A incerteza relativa variou de 5% a 36%, sendo tanto maior quanto menor a temperatura da amostra e maior o comprimento de onda. A análise das incertezas é apresentada

na Figura 17. Percebe-se que a principal fonte de incerteza foi o termovisor utilizado para medir a radiação oriunda da superfície da amostra metálica. A Tabela 3 indica que a incerteza expandida do termovisor foi assumida como 2 °C ou 2% do valor medido em graus Celsius. Para garantir caráter conservador à análise, escolheu-se o maior valor. Pode-se dizer que o valor de 2 °C teve impacto muito forte para os ensaios de menor temperatura da amostra. Menores temperaturas do objeto se relacionaram com menores temperaturas aparentes, isto é, sinal radiométrico pleno de menor magnitude. Nesse cenário, o valor de 2 °C impactou mais intensamente no cálculo da propagação da incerteza, levando a maiores valores de incerteza combinada para a estimativa da emissividade espectral.

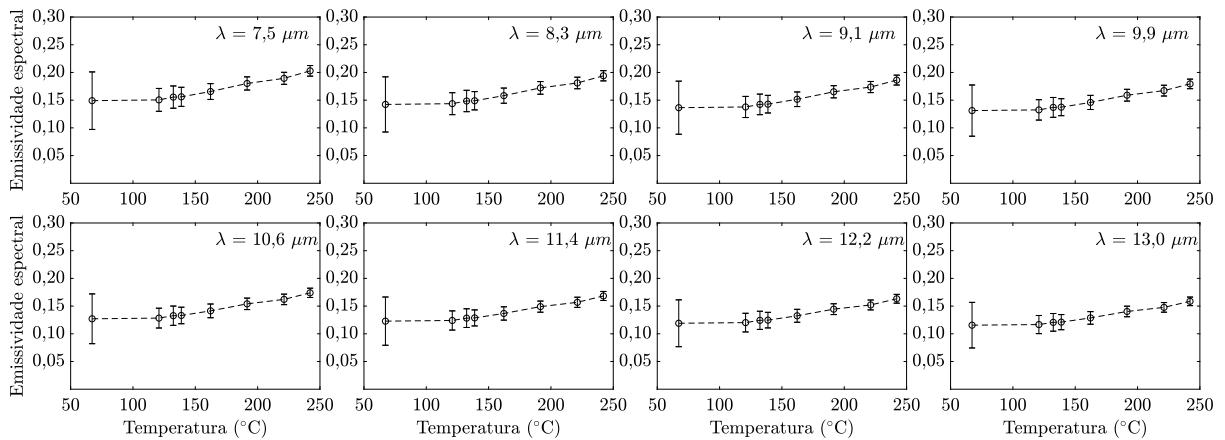


Figura 16 – Estimativas dos valores de emissividade espectral e suas respectivas incertezas expandidas para oito valores de comprimento de onda no intervalo LWIR em análise. Destaque para o efeito da temperatura e do espectro no resultado de medição da emissividade espectral.

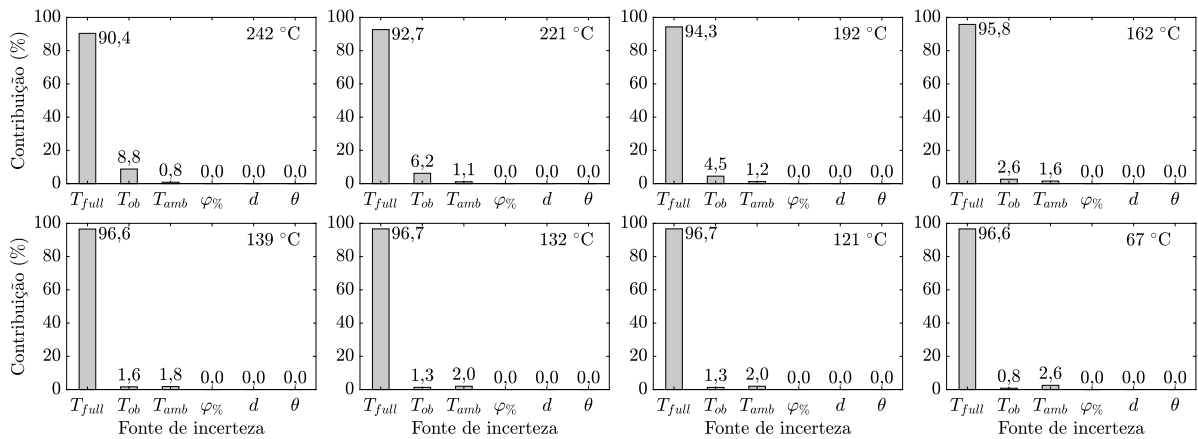


Figura 17 – Fontes de incerteza e suas contribuições para as incertezas combinadas das estimativas de emissividade espectral. Destaque para a temperatura de resposta plena T_{full} como principal fonte de incerteza.

A fim de criar um banco de dados para trabalhos futuros, as estimativas de emissividade espectral do aço AISI H13 foram extrapoladas para outros valores de ângulo de emissão θ utilizando os valores de resistividade elétrica encontrados e as Equações 2.23, 2.24 e 2.25. Extrapolou-se os resultados obtidos para $\theta = 37^\circ$ para ângulos de emissão de 0° a 75° . A Figura 18 apresenta os valores extrapolados de emissividade para os extremos da banda espectral

do termovisor FLIR SC660 (7,5 μm e 13 μm) e a menor e a maior temperaturas testadas (67 °C e 242 °C).

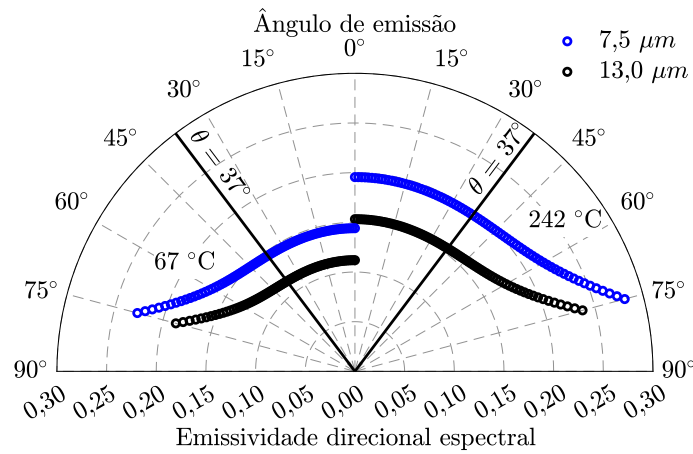


Figura 18 – Valores de emissividade direcional espectral extrapolados para ângulos de emissão de 0° a 75°, comprimentos de onda de 7,5 μm e 13 μm e temperaturas de 67 °C e 242 °C.

4.2 Análise dos sinais do termovisor

A Figura 19 apresenta os valores espectrais obtidos para os sinais radiométricos processados pelo termovisor em cada um dos oito testes de estimação da emissividade espectral da amostra de aço AISI H13. Obteve-se $S_{full,\lambda}$ a partir da soma dos sinais espectrais $S_{ob,\lambda}$, $S_{ref,\lambda}$ e $S_{atm,\lambda}$. Os valores foram normalizados, estabelecendo o maior valor encontrado ($S_{full,\lambda}$ para comprimento de onda de 8,03 μm e 242°C) igual a 1. Os valores de $S_{atm,\lambda}$ não foram representados pois apresentaram-se aproximadamente iguais a zero.

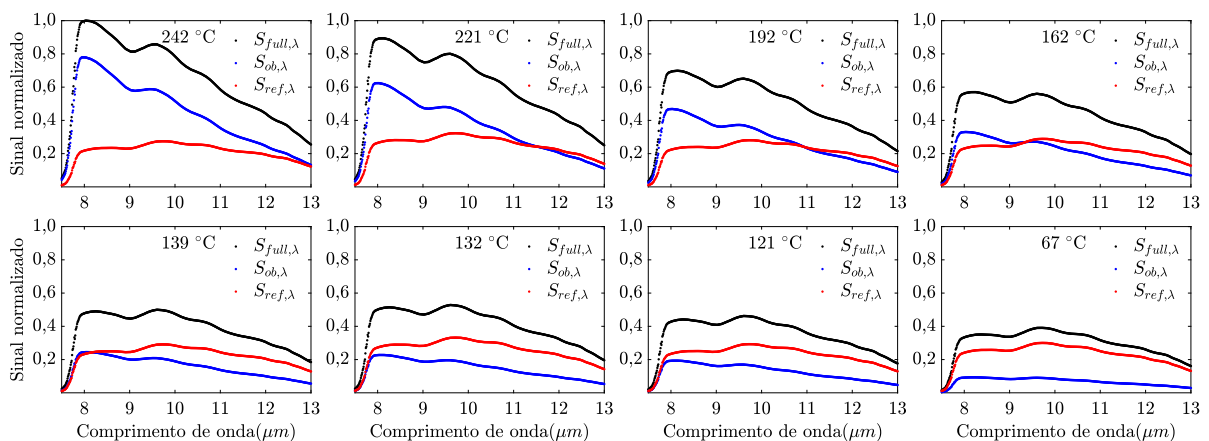


Figura 19 – Sinais espectrais normalizados para as oito temperaturas dos testes de estimação da emissividade. $S_{atm,\lambda}$ aproximadamente igual a zero no intervalo LWIR para todas as temperaturas testadas.

Nota-se que o sinal relacionado à radiação emitida pelo objeto foi majoritário para as situações de temperaturas mais altas e menores comprimentos de onda, enquanto o sinal referente à radiação refletida foi preponderante nas condições opostas. Tal tendência se justifica

pela distribuição da emissividade espectral do aço AISI H13, a qual apresentou maiores valores para maiores temperaturas e menores comprimentos de onda. Maiores valores de emissividade implicam em menores valores de refletividade, logo menores valores de sinal refletido. Ademais, de acordo com a formulação de Planck, maiores temperaturas implicam em maiores intensidades espectrais, com o ponto de máximo deslocando-se para comprimentos de onda menores (Lei do Deslocamento de Wien). O efeito combinado de maior intensidade espectral e de deslocamento do ponto de máximo para comprimentos de onda menores somou-se ao comportamento da emissividade estimada e implicou em maiores resultados para S_{ob} .

Para a temperatura de 242 °C o sinal S_{ob} foi maior que S_{ref} para todo o intervalo LWIR. O oposto aconteceu para as temperaturas de 67 °C, 121 °C e 132 °C. Para os testes realizados com temperatura do objeto de 221 °C, 192 °C, 162 °C e 139 °C, houve um comprimento de onda em que o sinal relacionado à radiação emitida pelo objeto igualou-se ao sinal associado à radiação refletida por ele. Os valores foram 11,53 μm , 10,93 μm , 9,35 μm e 8,01 μm , respectivamente.

Nos cenários de menor temperatura do objeto e maior comprimento de onda, faz-se necessário atenção especial ao controle das condições ambientes durante o ensaio termográfico de uma amostra metálica, evitando a presença de corpos quentes na vizinhança, uma vez que o sinal refletido tenderá a ser dominante. A Figura 20 traz a contribuição percentual do sinal do objeto, refletido e atmosférico para o sinal pleno, considerando todo o intervalo espectral de sensibilidade do termovisor. Nota-se que, para a temperatura de 162 °C e valores menores, a contribuição do sinal refletido foi maior que 50%, ou seja, o sinal refletido foi preponderante quando analisaram-se os sinais integrados na banda espectral de 7,5 μm a 13 μm .

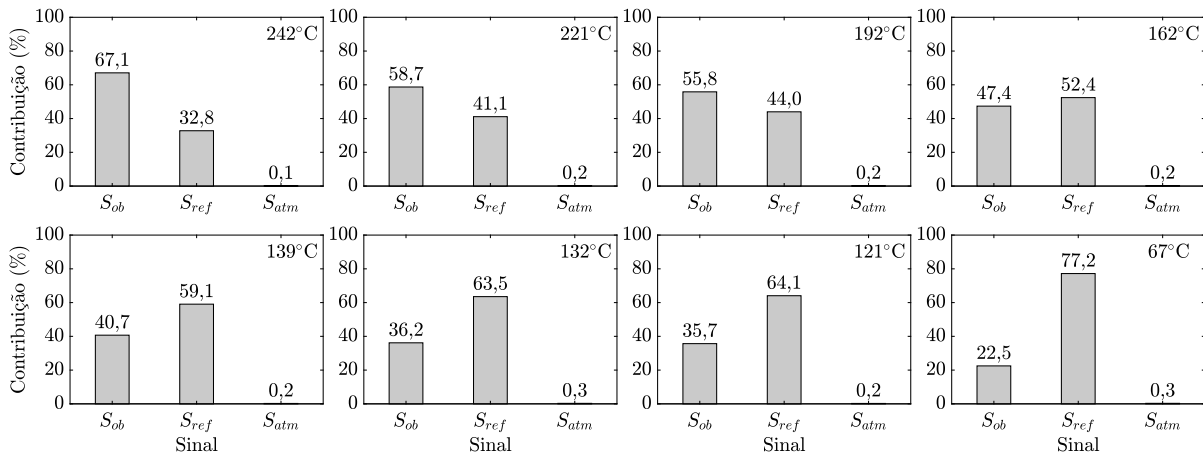


Figura 20 – Contribuição de cada uma das fontes de radiação para sinal pleno integrado no intervalo de 7,5 μm a 13 μm . Destaque para a preponderância do sinal refletido nas situações de temperaturas mais baixas.

O sinal referente à radiação oriunda da coluna de ar existente entre o termovisor e o objeto alvo foi aproximadamente zero, conforme observa-se na Figura 20. Um dos principais motivos foi o alto valor de transmissividade atmosférica. O valor médio de τ_{atm} foi 0,995, notadamente devido à pequena distância entre o termovisor e a superfície inspecionada. Dessa forma, pode-se dizer que o sinal $S_{atm,\lambda}$ pode ser desprezado durante os cálculos da rotina de pós-processamento, a fim de minimizar o esforço matemático, se as condições de medição

forem similares às relatadas no presentes estudo (intervalo espectral, intervalo de temperatura, instrumentos de medição, distância e condições ambientes).

4.3 Estimativas de temperatura da peça

Os valores de temperatura da peça durante o fresamento foram calculados para todos os nove termogramas pré-selecionados para cada condição de corte testada. Calculou-se, também, a estimativa da temperatura da peça aplicando o valor médio de temperatura aparente na rotina de pós-processamento. A Figura 21 apresenta um diagrama de caixa com os valores de temperatura da peça calculados para cada uma das condições de corte. Os valores obtidos a partir da temperatura aparente média são apresentados ao lado de cada caixa e variaram de 100 °C a 188 °C.

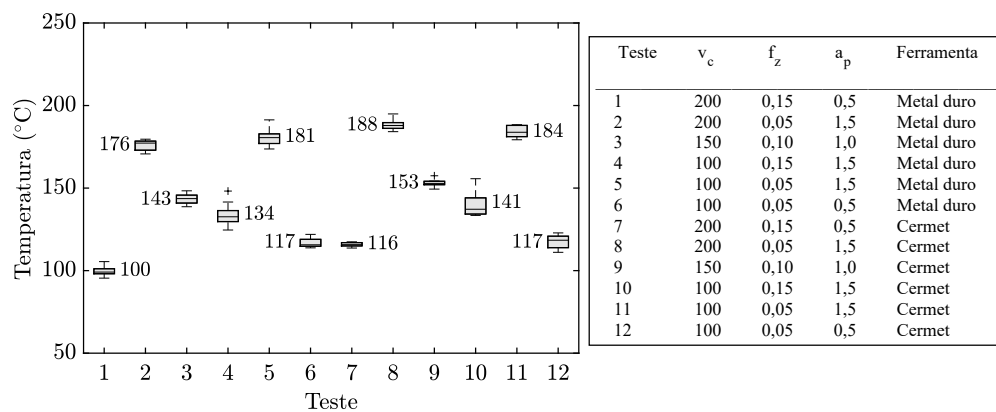


Figura 21 – Distribuição das estimativas de temperatura da peça durante o fresamento frontal para cada condição de corte testada.

Conforme é possível observar a partir da Figura 21, algumas condições de corte apresentaram maior dispersão dentre os resultados obtidos a partir dos 81 pontos dispostos nos nove termogramas selecionados para cada teste. Os testes 4 e 10 apresentaram os desvios padrões mais altos, 7,0 °C e 8,2 °C, respectivamente. Por outro lado, os testes 7 e 9 foram aqueles que apresentaram resultados de temperatura da peça mais homogêneos. Os desvios padrões foram de 1,3 °C e 2,2 °C, respectivamente.

A Figura 22 traz as estimativas de temperatura da peça com as respectivas incertezas combinadas expandidas para os doze testes realizados. Os valores das incertezas relativas variaram de 5% a 17%.

Comparando os resultados apresentados na Figura 22, observa-se que o aumento da profundidade de corte esteve associado ao aumento da temperatura da peça durante o fresamento. A comparação entre os resultados dos testes 5 e 6 e dos testes 11 e 12 ilustra essa observação. Comportamento semelhante foi reportado na literatura científica para medições durante fresamento do aço AISI 304 (MEDINA *et al.*, 2017) e de aços de baixo teor de elementos de liga (MA *et al.*, 2016). Por outro lado, a temperatura tendeu a diminuir com o aumento do avanço por dente, tal como se nota comparando as estimativas de temperatura da peça para os testes 4 e 5 e

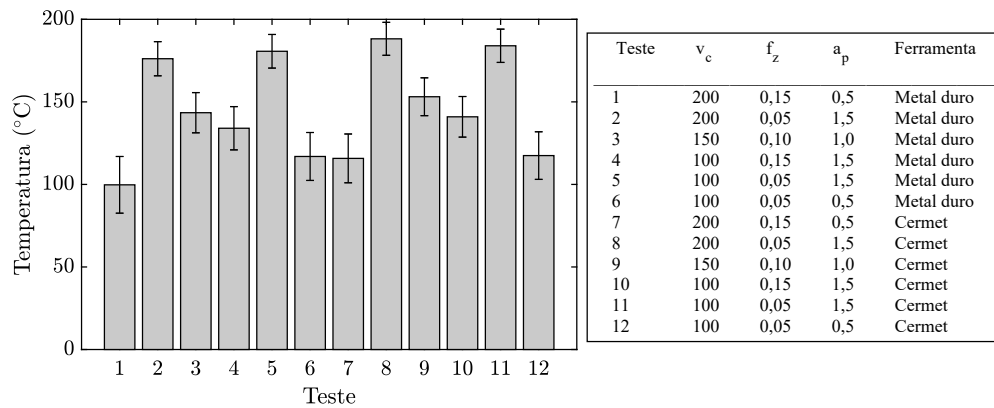


Figura 22 – Estimativas de temperatura da peça durante o fresamento frontal com suas respectivas incertezas expandidas para as doze condições de corte testadas.

para os testes 10 e 11. Esse comportamento contraintuitivo pode ser compreendido através da análise da natureza do instrumento de medição utilizado, uma vez que medidores de temperatura sem contato não conseguem visualizar a interface ferramenta-cavaco. Tendência similar foi encontrada na literatura científica para medições de temperatura usando termovisores durante fresamento de ligas de magnésio (KUCZMASZEWSKI; ZAGÓRSKI, 2013) e ligas de alumínio (LAURO; BRANDÃO; FILHO, 2013). O efeito da velocidade de corte foi analisado comparando os testes 2 e 5 e os testes 8 e 11, entretanto a mudança da velocidade de corte não implicou alterações de temperatura para além do intervalo de incerteza. A mudança da ferramenta de corte indicou valores de temperatura mais altos para os cortes que utilizaram cermet (testes 7 a 12) em relação aos cortes com metal duro (testes 1 a 6), todavia as diferenças se mantiveram dentro do intervalo de incerteza para todas as comparações.

A Figura 23 ilustra os efeitos de cada uma das cinco fontes de incerteza utilizadas no cálculo da incerteza combinada das estimativas de temperatura da peça para cada um dos doze testes realizados. As principais fontes de incerteza foram a emissividade espectral e a medição do fluxo de calor por radiação. Resultado semelhante foi encontrado por Muniz *et al.* (2014) no estudo de incertezas em medições termográficas.

A alta influência da emissividade no cálculo da incerteza combinada da temperatura da peça evidencia a importância de se ter um processo consistente de avaliação da emissividade da superfície alvo para uma medição termográfica. A distância e a umidade relativa do ambiente apresentaram contribuição aproximadamente igual a zero para os doze testes. Dessa forma, tais grandezas podem ser desprezadas durante o pós-processamento para reduzir o esforço computacional envolvido. Apesar da baixa emissividade da superfície da amostra de aço AISI H13, a temperatura ambiente apresentou pequena influência no cálculo da incerteza combinada da temperatura da peça. Os valores altos de temperatura do objeto permitem entender a pequena contribuição da temperatura ambiente, tal como reportado em estudos sobre análise de incertezas durante ensaios termográficos (LANE *et al.*, 2013; MUNIZ *et al.*, 2014; FERREIRA *et al.*, 2019a).

A Figura 24 apresenta uma comparação dos valores de temperatura da peça resultantes

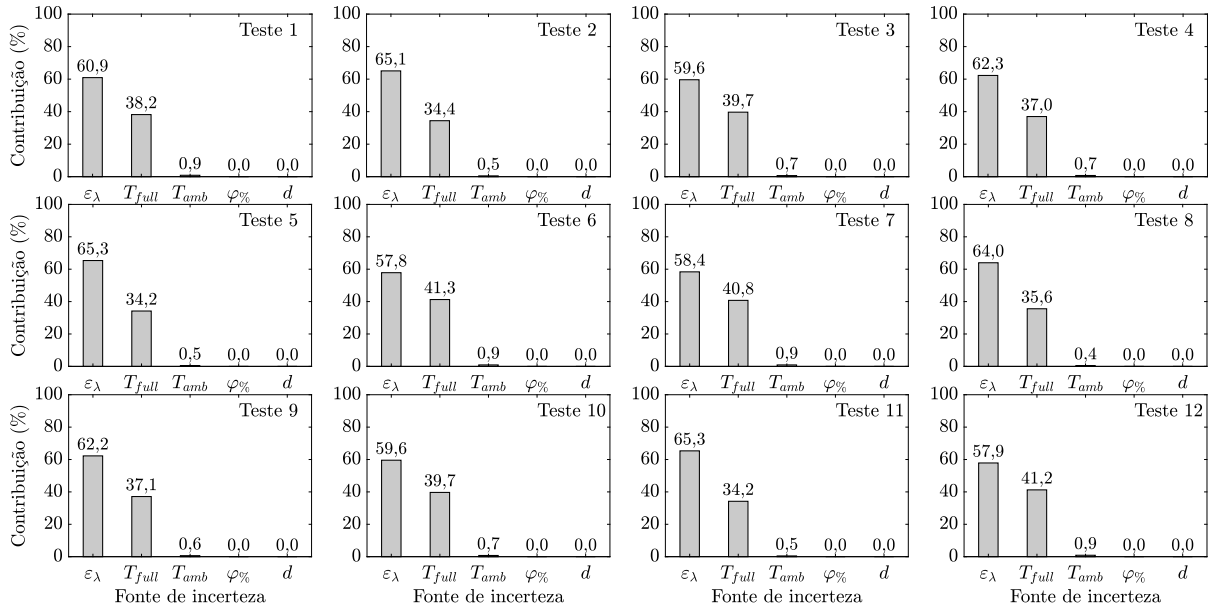


Figura 23 – Fontes de incerteza e suas contribuições para a incerteza combinada das estimativas de temperatura da peça durante o fresamento frontal. Ver Tabela 2 e Figura 21 para mais informações sobre os doze testes.

do procedimento direcional espectral proposto no presente estudo e os valores obtidos aplicando três métodos alternativos. O primeiro método alternativo utilizou a emissividade da superfície da amostra de aço AISI H13 como função apenas da temperatura, assumindo o modelo cinza-difuso da Equação 2.10. Este tipo de medição é o mais comum dentre os estudos que realizam a medição de temperatura de metais através de dispositivos IR e que não negligenciam a dependência da emissividade em relação à temperatura (PITTALÀ; MONNO, 2011; VALIORGUE *et al.*, 2013; YANG *et al.*, 2014). O terceiro e quarto métodos alternativos se basearam na consideração de emissividade constante e igual a, respectivamente, 0,14 e 0,07. Através de tais valores de emissividade, aplicou-se diretamente o equacionamento do software da câmera IR (Equação 2.2) para estimar a temperatura da peça durante o fresamento. Os valores de emissividade selecionados para os últimos dois modelos foram obtidos do manual do usuário do termovisor utilizado, o qual indicava tais valores para aço polido a 400 °C e 100 °C, respectivamente (FLIR, 2011).

Os valores obtidos utilizando a emissividade constante e igual a 0,07 foram aqueles que se apresentaram mais destoantes em relação aos demais, com valores 38% a 41% mais altos que as estimativas obtidas com o modelo direcional espectral proposto no presente estudo. Os menores valores de temperatura foram resultantes do modelo cinza-difuso, não se mostrando um modelo conservador. Em comparação com o modelo direcional espectral, o modelo cinza-difuso apresentou desvio médio de -10,5 °C, com diferenças relativas de 6% a 9%. Tais variações no valor de temperatura da peça podem influenciar a análise do processo de fresamento, portanto atenção especial deve ser direcionada ao processo de estimação da temperatura.

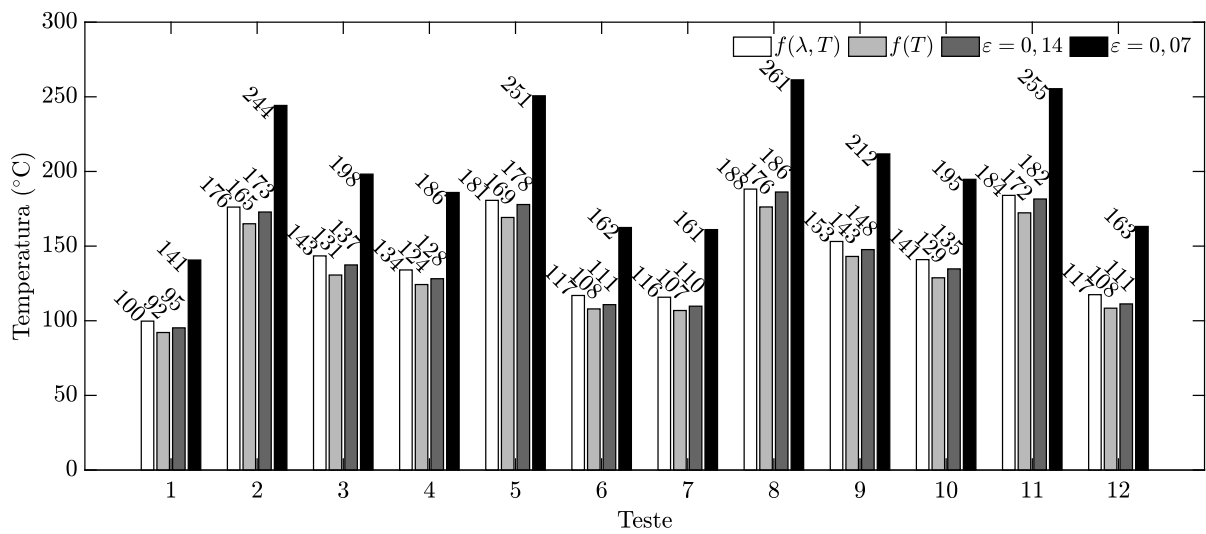


Figura 24 – Comparação das estimativas de temperatura da peça durante fresamento frontal obtidas a partir do método proposto neste trabalho e três métodos alternativos. $f(\lambda, T)$ se refere aos resultados obtidos a partir do método direcional espectral proposto neste trabalho, enquanto $f(T)$ indica as estimativas oriundas do modelo de superfície difusa e cinza. Ver Tabela 2 e Figura 21 para mais informações sobre os doze testes.

5 Conclusões

Este trabalho apresenta uma metodologia para estimar a temperatura de peças metálicas durante o fresamento frontal utilizando termovisores que operam na faixa do infravermelho longo. A metodologia proposta combinou formulações derivadas da teoria da onda eletromagnética com medições tomadas a partir de aparatos experimentais. Através das montagens experimentais foram medidas grandezas que serviram como variáveis de entrada para o modelo matemático de pós-processamento. A formulação matemática valeu-se de relações de transferência de calor por radiação em contexto direcional espectral. A rotina de pós-processamento foi iterativa e o seu critério de parada baseou-se no balanço dos sinais radiométricos processados pelo termovisor.

O procedimento proposto se dividiu em duas etapas: estimação dos valores de emissividade da amostra metálica e estimação da temperatura da peça metálica durante fresamento frontal. Amostras de aço AISI H13 foi utilizada durante todos os experimentos realizados. Valores de emissividade espectral de 0,12 a 0,20, com incerteza relativa foi de 5% a 36%, foram obtidos para oito diferentes valores de temperaturas da amostra metálica entre 50 °C e 250 °C e comprimento de onda de 7,5 μm a 13 μm . A temperatura da peça de aço AISI H13 foi medida para fresamento frontal sob doze condições de corte diferentes. Os valores de emissividade espectral obtidos na primeira etapa do trabalho foram utilizados no cálculo da temperatura da peça. Dessa maneira, não se negligenciou a dependência que a emissividade possui em relação à temperatura, ao espectro e à direção, ao contrário do que comumente se encontra na literatura científica. As estimativas de temperatura da peça durante o processo de usinagem variaram de 100 °C a 188 °C, com incerteza relativa de 5% a 17%. A partir da análise de incertezas, notou-se que o principal contribuinte para a incerteza propagada da estimativa da temperatura foi a emissividade. Este fato indica que a estimativa dos valores de emissividade deve ser feita a partir de modelos consistentes, de modo a minimizar os erros envolvidos e, conseqüentemente, garantir um resultado de medição mais confiável.

A análise dos sinais radiométricos processados pelo termovisor nos oito testes realizados para estimativa da emissividade indicou que a influência do sinal referente à radiação emitida pela atmosfera existente entre o termovisor e o objeto alvo é desprezível quando comparada ao efeito dos demais sinais. Dessa maneira, observa-se que tal parcela pode ser desprezada na modelagem matemática da rotina de pós-processamento, de modo que o esforço computacional envolvido seja reduzido. O predomínio do sinal referente à radiação refletida na contribuição para o sinal pleno nos cenários de baixa temperatura da amostra metálica evidenciou a importância da realização das inspeções termográficas em ambientes controlados.

Três métodos alternativos foram aplicados para calcular a temperatura da peça durante o fresamento frontal. Um desses métodos baseou-se no comportamento de superfície cinza, desprezou a influência espectral e utilizou valores de emissividade total na banda LWIR, mas considerou sua dependência em relação à temperatura. Os demais métodos assumiram a emis-

sividade constante e igual a valores indicados pelo manual do fabricante do termovisor, isto é, desprezaram a dependência em relação à temperatura, ao espectro e à direção. Observou-se que a aplicação de diferentes métodos levou a estimativas de temperatura da peça distintas. A diferença em relação aos valores obtidos a partir da metodologia apresentada no presente estudo foi de até 41%. Os valores obtidos a partir do modelo direcional espectral proposto foram em média 10,5 °C mais altos que aqueles obtidos a partir do modelo de superfície cinza.

Percebeu-se que atenção deve ser destinada ao modelo utilizado para estimar a temperatura da peça durante fresamento frontal, uma vez que a utilização de modelos diferentes levou a estimativas de temperatura diferentes. Modelos simplificados para o equacionamento de transferência de calor por radiação podem comprometer os resultados da medição e as análises que serão realizadas a partir deles. A dependência que a emissividade de metais pode apresentar em relação à temperatura, ao espectro e à direção é significativa, tal como foi mostrado neste trabalho para o aço AISI H13. Desprezar tais efeitos, sem um estudo prévio, não é recomendável. Nesse contexto, destaca-se que o modelo direcional espectral proposto no presente trabalho apresenta-se como uma alternativa de metodologia mais consistente e robusta, sem demandar investimentos financeiros ou aquisição de novos equipamentos.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

O presente trabalho se encerra com a análise das estimativas de temperatura da peça metálica durante o fresamento frontal, porém trabalhos futuros podem ser realizados para aprofundar e consolidar a metodologia proposta. Maior estudo acerca da determinação dos valores espectrais do índice de refração e do coeficiente de extinção de superfícies metálicas faz-se necessário. A implementação de formulações que deem maior enfoque para o cálculo do índice de refração e do coeficiente de extinção da superfície metálica garantirá maior robustez ao modelo proposto no presente trabalho. Modelos para estimar as propriedades ópticas de materiais metálicos para comprimentos de onda menores que 5 μm permitirão ampliar a aplicabilidade do procedimento de medição proposto para termovisores que operam nas bandas MWIR e SWIR.

A medição experimental das grandezas ópticas também é um ponto a ser explorado, uma vez que possibilitará validar o modelo semiempírico proposto. A validação da metodologia exposta no presente trabalho também pode ser executada através da comparação entre os valores de temperatura provenientes do modelo proposto e os resultados obtidos mediante um aparato experimental envolvendo medidores de temperatura por contato embutidos em diversos pontos da peça a ser usinada.

A realização de testes com outras amostras metálicas enriquecerá o presente estudo. Sugere-se trabalhar com ligas metálicas, tais como o aço AISI H13 utilizado neste trabalho, e com metais puros. O trabalho com metais puros pode permitir maior facilidade na etapa de medição das propriedades eletromagnéticas, ópticas e radiativas, notadamente pela maior quantidade de trabalhos presentes na literatura científica.

Referências

- ARATA, Y.; MIYAMOTO, I. Laser Welding. *Technocrat*, v. 11, n. 5, p. 33–42, 01 1976. Citado na página 17.
- ASTM. *A681-07: Standard Specification for Tool Steels Alloy*. 2007. Citado na página 35.
- ASTM. *E230-17: Standard Specification for Temperature-Electromotive Force (emf) Tables for Standardized Thermocouples*. 2017. Citado na página 45.
- ASTM. *E220-19: Test Method for Calibration of Thermocouples By Comparison Techniques*. 2019. Citado na página 36.
- BAGAVATHIAPPAN, S. *et al.* Infrared thermography for condition monitoring – a review. *Infrared Physics and Technology*, v. 60, p. 35 – 55, 2013. Citado na página 19.
- BAGAVATHIAPPAN, S. *et al.* Online monitoring of cutting tool temperature during micro-end milling using infrared thermography. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, British Institute of Non-Destructive Testing (BINDT), v. 57, n. 1, p. 9–17, jan. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 34.
- BIPM. Bureau International des Poids et Mesures: Techniques for approximating the international temperature scale of 1990. 1997. Citado 3 vezes nas páginas 10, 36 e 70.
- BOYDEN, S. B.; ZHANG, Y. Temperature and wavelength-dependent spectral absorptivities of metallic materials in the infrared. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, v. 20, n. 1, p. 9–15, 2006. Citado na página 28.
- BRAMSON, M. *Infrared Radiation: A Handbook for Applications*. New York: Springer Science and Business Media, 1968. Citado na página 17.
- CHEN, G. *et al.* Measurement and finite element simulation of micro-cutting temperatures of tool tip and workpiece. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 75, p. 16 – 26, 2013. ISSN 0890-6955. Citado 3 vezes nas páginas 16, 31 e 32.
- CHEN, X.; LV, Q.; YI, X. Responsivity analysis of micro-bolometer under pulsed bias. *Optik*, v. 122, n. 23, p. 2143 – 2146, 2011. Citado na página 22.
- CUI, D. *et al.* An investigation of tool temperature in end milling considering the flank wear effect. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 131-132, p. 613 – 624, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 16, 17 e 33.
- DAVIES, M. *et al.* On The Measurement of Temperature in Material Removal Processes. *CIRP Annals*, v. 56, n. 2, p. 581 – 604, 2007. ISSN 0007-8506. Citado 5 vezes nas páginas 16, 17, 19, 31 e 33.
- DEL CAMPO, L. *et al.* Emissivity measurements on aeronautical alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 489, n. 2, p. 482–487, 2010. Citado na página 17.
- EFIMOVICH, I. A.; ZOLOTUKHIN, I. S. Temperature Field Measurement in a Cutting Tool by Laser Interferometry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, v. 754, p. 012002, feb 2020. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 31.

- FERREIRA, R. *et al.* Uncertainty analysis applied to electrical components diagnosis by infrared thermography. *Measurement*, v. 132, p. 263 – 271, 2019. ISSN 0263-2241. Citado 3 vezes nas páginas 16, 17 e 52.
- FERREIRA, R. A. M. *et al.* A directional-spectral approach to estimate temperature of outdoor PV panels. *Solar Energy*, Elsevier, v. 183, p. 782–790, 2019. Citado na página 39.
- FIGLIOLA, R. S. *Theory and Design for Mechanical Measurements*. 7th. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2019. ISBN 978-1-119-47565-1. Citado na página 30.
- FLIR. User's manual: FLIR SC6xx. 2011. Citado 4 vezes nas páginas 9, 10, 53 e 62.
- GAITONDE, V. N. *et al.* Machinability Evaluation in Hard Milling of AISI D2 Steel. *Materials Research*, scielo, v. 19, p. 360 – 369, 04 2016. ISSN 1516-1439. Citado 3 vezes nas páginas 16, 31 e 33.
- GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, L. *et al.* Infrared normal spectral emissivity of Ti–6Al–4V alloy in the 500–1150K temperature range. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 541, p. 144 – 149, 2012. Citado na página 28.
- HAGEN, E.; RUBENS, H. Metallic reflection. *Ans. Phys.*, v. 1, n. 2, p. 352–375, 1900. Citado na página 28.
- HAN, J. *et al.* In situ measurement of cutting edge temperature in turning using a near-infrared fiber-optic two-color pyrometer. *Measurement*, v. 156, p. 107595, 2020. ISSN 0263-2241. Citado na página 16.
- HOWELL, J. R.; MENGÜÇ, M. P.; SIEGEL, R. *Thermal Radiation Heat Transfer*. 6th. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 16, 17, 24, 26 e 29.
- INDHU, R. *et al.* Overview of laser absorptivity measurement techniques for material processing. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, Springer Science and Business Media LLC, v. 5, n. 4, p. 458–481, out. 2018. Citado na página 28.
- JCGM. Joint Committee for Guides in Metrology JCGM100: Evaluation of Measurement Data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. 2008. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 44.
- KAPLAN, H. *Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment*. Bellingham, Wash: SPIE, 2007. ISBN 0819467235. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 25.
- KASAP, S. O. Electrical and thermal conduction in solids. In: *Principles of Electronic Materials and Devices*. 4th. ed. New York: McGraw-Hill, 2018. cap. 2, p. 125–212. Citado na página 29.
- KEYSIGHT TECHNOLOGIES. Keysight 34970A/34972A Data Acquisition/Switch Unit: User's Guide. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 65.
- KIM, D.-H.; LEE, C.-M. A study of cutting force and preheating-temperature prediction for laser-assisted milling of Inconel 718 and AISI 1045 steel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 71, p. 264 – 274, 2014. ISSN 0017-9310. Citado na página 17.
- KING, J. L. *et al.* Computation of total hemispherical emissivity from directional spectral models. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 109, p. 894 – 906, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.

- KOMANDURI, R.; HOU, Z. A review of the experimental techniques for the measurement of heat and temperatures generated in some manufacturing processes and tribology. *Tribology International*, v. 34, n. 10, p. 653 – 682, 2001. Citado na página 31.
- KUCZMASZEWSKI, J.; ZAGÓRSKI, I. Methodological problems of temperature measurement in the cutting area during milling magnesium alloys. *Management and Production Engineering Review*, Vol. 4, No. 3, p. 26–33, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 16, 17, 31, 32 e 52.
- LA VEIGNE, J. *et al.* LWIR NUC using an uncooled microbolometer camera. In: JR., J. A. B.; JR., R. L. M. (Ed.). *Technologies for Synthetic Environments: Hardware-in-the-Loop Testing XV*. Santa Barbara, CA: SPIE, 2010. v. 7663, p. 47 – 55. Citado na página 21.
- LAHIRI, B. *et al.* Medical applications of infrared thermography: A review. *Infrared Physics and Technology*, v. 55, n. 4, p. 221 – 235, 2012. Citado na página 19.
- LANE, B. *et al.* Uncertainty of temperature measurements by infrared thermography for metal cutting applications. *Metrologia*, IOP Publishing, v. 50, n. 6, p. 637–653, nov 2013. Citado 4 vezes nas páginas 16, 17, 30 e 52.
- LAURO, C. *et al.* Monitoring and processing signal applied in machining processes – A review. *Measurement*, v. 58, p. 73 – 86, 2014. ISSN 0263-2241. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 31.
- LAURO, C.; BRANDÃO, L.; FILHO, S. L. R. Monitoring the temperature of the milling process using infrared camera. *Scientific Research and Essays*, v. 8, p. 1112–1120, 06 2013. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 52.
- LI, H. *et al.* Emissivity calibration and temperature measurement of high strength steel sheet in hot stamping process. *Applied Mechanics and Materials*, v. 148-149, p. 1473–1477, 12 2011. Citado na página 17.
- LIMA, H. V. *et al.* Temperature assessment when milling aisi d2 cold work die steel using tool-chip thermocouple, implanted thermocouple and finite element simulation. *Applied Thermal Engineering*, v. 143, p. 532 – 541, 2018. Citado na página 32.
- LIU, Y. F. *et al.* Experimental Investigation of Emissivity of Steel. *International Journal of Thermophysics*, v. 34, n. 3, p. 496–506, 2013. Citado na página 32.
- LUCCHI, E. Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 3077 – 3090, 2018. Citado na página 19.
- MA, Y. *et al.* Prediction of surface residual stress after end milling based on cutting force and temperature. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 235, p. 41 – 48, 2016. ISSN 0924-0136. Citado 3 vezes nas páginas 16, 31 e 51.
- MASMIATI, N. *et al.* Optimization of cutting conditions for minimum residual stress, cutting force and surface roughness in end milling of S50C medium carbon steel. *Measurement*, v. 86, p. 253 – 265, 2016. ISSN 0263-2241. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 31.
- MEDINA, N. *et al.* Evaluating temperature in faced milling operations by infrared thermography. *Thermal Science*, v. 21, n. 6 Part B, p. 3051–3061, 2017. Citado 5 vezes nas páginas 16, 17, 31, 33 e 51.

MIHALOW, F. A. Radiation Thermometry in the Steel Industry. In: DEWITT, D. P.; NUTTER, G. D. (Ed.). *Theory and Practice of Radiation Thermometry*. New York: John Wiley and Sons, 1988. cap. 16, p. 861–904. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 25.

MINKINA, W.; DANIEL, K. Modeling of atmospheric transmission coefficient in infrared for thermovision measurements. In: *14th International Conference on Infrared Sensors and Systems*. Wunstorf: AMA Service GmbH, 2015. p. 903–907. Citado na página 23.

MINKINA, W.; DUDZIK, S. *Infrared Thermography: Errors and Uncertainties*. 1st. ed. Chippenham: John Wiley and Sons, 2009. Citado 10 vezes nas páginas 8, 20, 21, 22, 24, 25, 30, 38, 39 e 44.

MODEST, M. F. *Radiative Heat Transfer*. 3rd. ed. Boston: Academic Press, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 27.

MUNIZ, P. R. *et al.* Handy method to estimate uncertainty of temperature measurement by infrared thermography. *Optical Engineering*, SPIE, v. 53, n. 7, p. 1–7, 2014. Citado na página 52.

NATIONAL INSTRUMENTS. NI: User guide and specifications: USB-9211. 2007. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 64.

NICHOLAS, J. V.; WHITE, D. R. *Traceable temperatures : an introduction to temperature measurement and calibration*. Chichester New York: Wiley, 2001. ISBN 0-471-49291-4. Citado na página 33.

OROSCO, J.; COIMBRA, C. Temperature-dependent infrared optical and radiative properties of platinum. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 143, p. 118471, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 29.

OSORNIO-RIOS, R. A.; ANTONINO-DAVIU, J. A.; ROMERO-TRONCOSO, R. d. J. Recent industrial applications of infrared thermography: A review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 15, n. 2, p. 615–625, 2019. Citado na página 19.

PITTALÀ, G.; MONNO, M. A new approach to the prediction of temperature of the workpiece of face milling operations of Ti-6Al-4V. *Applied Thermal Engineering*, v. 31, n. 2, p. 173 – 180, 2011. ISSN 1359-4311. Citado 4 vezes nas páginas 16, 31, 34 e 53.

REZENDE, B. A.; MAGALHÃES, F. de C.; RUBIO, J. C. C. Study of the measurement and mathematical modelling of temperature in turning by means equivalent thermal conductivity. *Measurement*, v. 152, p. 107275, 2020. ISSN 0263-2241. Citado na página 31.

ROGALSKI, A. Infrared detectors: an overview. *Infrared Physics and Technology*, v. 43, n. 3, p. 187 – 210, 2002. Citado na página 21.

ROGALSKI, A.; MARTYNIUK, P.; KOPYTKO, M. Challenges of small-pixel infrared detectors: a review. *Reports on Progress in Physics*, IOP Publishing, v. 79, n. 4, p. 046501, mar 2016. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

ROSALES-SAIZ, F. *et al.* Influence of spark plasma consolidation conditions on the superconducting properties of (Bi,Pb)-Sr-Ca-Cu-O ceramic samples. *Ceramics International*, v. 42, n. 15, p. 17482 – 17488, 2016. Citado na página 40.

- SHAW, M. C. *Metal Cutting Principles*. New York: Oxford University Press, 2005. ISBN 0-19-514206-3. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 31.
- SIMEONE, A.; WOOLLEY, E.; RAHIMIFARD, S. Tool State Assessment for Reduction of Life Cycle Environmental Impacts of Aluminium Machining Processes via Infrared Temperature Monitoring. *Procedia CIRP*, v. 29, p. 526 – 531, 2015. The 22nd CIRP Conference on Life Cycle Engineering. Citado 4 vezes nas páginas 16, 17, 31 e 33.
- SVATOŠ, V. *et al.* Precise determination of thermal parameters of a microbolometer. *Infrared Physics and Technology*, v. 93, p. 286 – 290, 2018. ISSN 1350-4495. Citado na página 21.
- TAYLOR HOBSON. Surtronic 25: User's guide. 2013. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 68.
- TEODORESCU, G. *Radiative emissivity of metals and oxidized metals at high temperature*. 157 p. Tese (Doutorado) — Auburn University, Alabama, USA, 01 2007. Citado na página 28.
- TESTO-SE. Testo 622: Instruction manual. 2009. Citado 3 vezes nas páginas 9, 10 e 63.
- TRAN, Q. H. *et al.* Effects of Ambient Temperature and Relative Humidity on Subsurface Defect Detection in Concrete Structures by Active Thermal Imaging. *Sensors*, v. 17, n. 8, p. 1718–1735, 2017. Citado na página 23.
- VALIORGUE, F. *et al.* Emissivity calibration for temperatures measurement using thermography in the context of machining. *Applied Thermal Engineering*, v. 58, n. 1-2, p. 321–326, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 17, 34 e 53.
- VOLLMER, M.; MÖLLMANN, K.-P. *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. 2nd. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2018. Citado 9 vezes nas páginas 8, 16, 20, 21, 22, 24, 25, 38 e 39.
- WANG, P. *et al.* A new experimental apparatus for emissivity measurements of steel and the application of multi-wavelength thermometry to continuous casting billets. *Review of Scientific Instruments*, v. 89, n. 5, p. 054903, 2018. Citado na página 17.
- WANG, P. *et al.* Effects of the temperature and roughness on the metal emissivity. In: IEEE. *27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC)*. Qingdao, China, 2015. p. 6197–6200. Citado na página 17.
- WEN, C. Investigation of steel emissivity behaviors: Examination of Multispectral Radiation Thermometry (MRT) emissivity models. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 53, n. 9-10, p. 2035–2043, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 47.
- YANG, G. *et al.* Non-contact temperature measurement by infrared pyrometer in high speed milling. *Applied Mechanics and Materials*, v. 668-669, p. 969–972, 10 2014. Citado 3 vezes nas páginas 32, 34 e 53.
- YASHIRO, T.; OGAWA, T.; SASAHARA, H. Temperature measurement of cutting tool and machined surface layer in milling of CFRP. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 70, p. 63 – 69, 2013. ISSN 0890-6955. Citado 3 vezes nas páginas 16, 17 e 32.
- ZHU, C.; HOBBS, M. J.; WILLMOTT, J. R. An accurate instrument for emissivity measurements by direct and indirect methods. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 31, n. 4, p. 044007, jan 2020. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 24.

APÊNDICE A – Fichas técnicas dos equipamentos

A.1 Termovisor

Aplicação: medição do fluxo de calor por radiação no espectro infravermelho LWIR durante os ensaios para avaliação da emissividade espectral e os ensaios para estimação da temperatura durante o fresamento frontal das amostras de aço AISI H13.



Figura 25 – Termovisor utilizado durante os experimentos. Fonte: FLIR (2011).

Tabela 5 – Características técnicas do termovisor utilizado durante os experimentos. Fonte: FLIR (2011).

Modelo	FLIR SC660
Lente	19 mm
FOV	45° x 34°
Tipo de detector	Microbolômetros não refrigerados
Resolução	640 x 480 pixels
IFOV	1,3 mrad
Faixa do espectro	7,5 μm - 13 μm
Sensibilidade térmica	30 mK a 30 °C
Faixa de medição de temperatura	-40 °C a 1500 °C
Incerteza	± 2 °C ou $\pm 2\%$
Temperatura de operação	-15 °C a 50 °C
Dimensões	324 mm x 146,7 mm x 144 mm
Peso	1,9 kg

A.2 Termo-higrômetro

Aplicação: monitoramento de temperatura e umidade relativa ambientes durante calibração do termopar, ensaios para avaliação da emissividade espectral e ensaios para estimação da temperatura durante o fresamento frontal das amostras de aço AISI H13.



Figura 26 – Termo-higrômetro utilizado para monitoramento das condições ambientes. Fonte: Testo-SE (2009).

Tabela 6 – Características técnicas do termo-higrômetro utilizado para monitoramento das condições ambientes. Fonte: Testo-SE (2009).

Modelo	Testo 622
Taxa de medição	10 s
Temperatura de operação	-10 °C a 60 °C
Dimensões	185 mm x 105 mm x 36 mm
Peso	240 g
TEMPERATURA	
Faixa de medição	-10 °C a 60 °C
Resolução	0,1 °C
Incerteza	±0,4 °C
UMIDADE RELATIVA	
Faixa de medição	0% a 100%
Resolução	0,1%
Incerteza	±3%

A.3 Sistema de aquisição de dados para termopar

Aplicação: leitura da força eletromotriz gerada pelo termopar tipo T durante o ensaio de calibração do termopar e os ensaios para avaliação da emissividade espectral da amostra de aço AISI H13.



Figura 27 – Sistema de aquisição de dados utilizado para o termopar tipo T.

Tabela 7 – Características técnicas do sistema de aquisição de dados utilizado para o termopar tipo T. Fonte: National Instruments (2007).

Modelo	NI 9211
Resolução	24 bits
Temperatura de operação	0 °C a 60 °C
Faixa de medição de tensão	-80 mV a 80 mV
Erro de offset	$\pm 20 \mu V$
Erro de ganho	$\pm 0,1\%$
Dimensões	140 mm x 86 mm x 25 mm
Peso	350 g

A.4 Sistema de aquisição de dados para termorresistência

Aplicação: leitura da temperatura medida pela termorresistência PT-100 durante o ensaio de calibração do termopar tipo T.



Figura 28 – Sistema de aquisição de dados utilizado para termorresistência.

Tabela 8 – Características técnicas do sistema de aquisição de dados utilizado para a termorresistência. Fonte: Keysight Technologies (2019).

Modelo	Agilent 34970A
Resolução	22 bits
Temperatura de operação	0 °C a 55 °C
Faixa de medição de temperatura	-200 °C a 600 °C
Incerteza	$\pm 0,06$ °C
Dimensões	374 mm x 254 mm x 104 mm
Peso	3,6 kg

A.5 Termorresistência PT-100

Aplicação: termorresistência utilizada como termômetro de referência durante a calibração do termopar tipo T.



Figura 29 – Termorresistência PT-100 4 fios Ecil.

Tabela 9 – Características técnicas da termorresistência utilizada.

Tipo	PT-100 a 4 fios
TCR	$0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Faixa de medição	$0 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $420 \text{ } ^\circ\text{C}$
Erro	$-0,02 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $0,39 \text{ } ^\circ\text{C}$
Incerteza de calibração	$0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $0,07 \text{ } ^\circ\text{C}$
Comprimento	320 mm
Diâmetro	6 mm

A.6 Forno de calibração

Aplicação: fonte de calor, com bloco equalizador, utilizada durante o processo de calibração do termopar tipo T no intervalo de temperatura de 50 °C a 250 °C.



(a) Forno de baixa temperatura.



(b) Forno de alta temperatura.

Figura 30 – Fornos de calibração utilizados na calibração do termopar.

Tabela 10 – Características técnicas dos fornos de calibração utilizados na calibração do termopar.

BAIXA TEMPERATURA	
Modelo	Ecil BT
Faixa de medição temperatura	($T_{amb} - 50$) °C a 140 °C
Resolução	0,1 °C
Imersão máxima	157 mm
Dimensões	300 mm x 340 mm x 170 mm
Peso	11 kg
ALTA TEMPERATURA	
Modelo	Ecil AT
Faixa de medição temperatura	150 °C a 1200 °C
Resolução	1 °C
Imersão máxima	80 mm
Dimensões	300 mm x 340 mm x 170 mm
Peso	9,7 kg
INCERTEZAS	
Uniformidade radial	0,12 °C a 0,15 °C
Uniformidade axial	0,42 °C a 1,26 °C
Estabilidade	0,05 °C a 0,06 °C

A.7 Medidor de rugosidade

Aplicação: medidor de rugosidade utilizado para medir o desvio aritmético médio do perfil de rugosidade das superfícies do aço AISI H13.

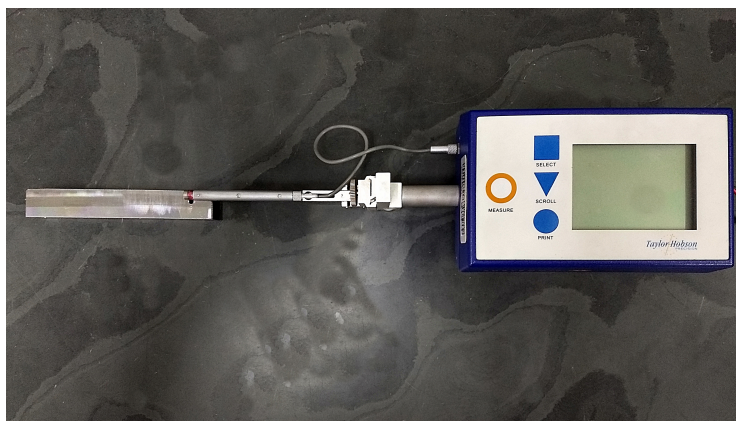


Figura 31 – Medidor de rugosidade Taylor Hobson Surtronic 25.

Tabela 11 – Características técnicas do medidor de rugosidade. Fonte: Taylor Hobson (2013).

Modelo	Taylor Hobson Surtronic 25
Resolução	0,01 μm
Temperatura de operação	5 °C a 40 °C
Faixa de medição	300 μm
Padrão de referência	$R_a = 6 \mu m$
Cut-off	0,8 mm
Incerteza	$\pm 2\%$
Dimensões	127 mm x 85 mm x 60 mm
Peso	450 g

A.8 Centro de usinagem

Aplicação: centro de usinagem utilizado durante a etapa de estimação da temperatura de fresamento frontal do aço AISI H13.



Figura 32 – Centro de usinagem ROMI Discovery 560.

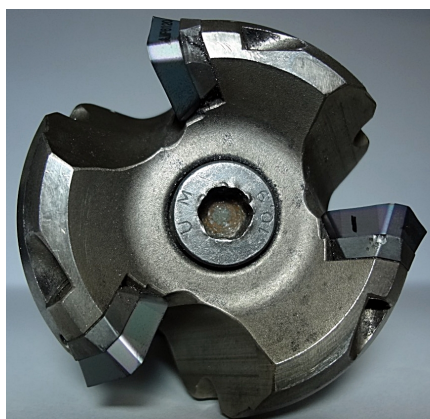


Figura 33 – Fresa de diâmetro 50 mm e 3 dentes.

APÊNDICE B – Calibração do termopar

Para a realização da calibração do termopar tipo T, utilizaram-se os polinômios de interpolação para termopares padrão, conforme BIPM (1997). As Equações B.1 e B.2 apresentam os polinômios interpoladores para o termopar tipo T, enquanto a Tabela 12 contém os valores dos coeficientes. Com os polinômios interpoladores é possível elaborar tabelas de referência, relacionando os valores de temperatura (T) com os valores de potencial elétrico (V) e vice-versa.

$$V = \sum_{i=1}^8 c_i T^i. \quad (\text{B.1})$$

$$T = \sum_{i=1}^6 d_i V^i. \quad (\text{B.2})$$

Tabela 12 – Coeficientes do polinômio interpolador para termopar tipo T. Fonte: (BIPM, 1997).

i	c_i	d_i
1	$3,87481063640 \cdot 10^{-2}$	$2,592800 \cdot 10^1$
2	$3,32922278800 \cdot 10^{-5}$	$-7,602961 \cdot 10^{-1}$
3	$2,06182434040 \cdot 10^{-7}$	$4,637791 \cdot 10^{-2}$
4	$-2,18822568460 \cdot 10^{-9}$	$-2,165394 \cdot 10^{-3}$
5	$1,09968809280 \cdot 10^{-11}$	$6,048144 \cdot 10^{-5}$
6	$-3,08157587720 \cdot 10^{-14}$	$-7,293422 \cdot 10^{-7}$
7	$4,54791352900 \cdot 10^{-17}$	
8	$-2,75129016730 \cdot 10^{-20}$	

A Tabela 13 traz os valores medidos durante a etapa de calibração do termopar tipo T que seria, posteriormente, utilizado na etapa experimental de medição da emissividade da amostra metálica. Foram utilizados sete pontos de calibração no intervalo de 50 °C a 250 °C: 50 °C, 75 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C e 250 °C. Para cada ponto de calibração foram registradas três medições, com intervalos de 1 minuto, do valor indicado pelo termômetro de referência e pelo termopar tipo T. O valor médio das três medições foi utilizado. Na tabela, tem-se que: ponto de referência é o valor de temperatura definido no visor do forno de calibração, valor de referência se refere à temperatura medida a partir do termômetro de referência utilizado (termorresistência PT-100 calibrada), valor do sensor indica a força eletromotriz medida pelo o termopar tipo T em calibração e erro diz respeito à diferença entre os valores indicados pelo termômetro de referência e o termopar em calibração.

Tabela 13 – Calibração do termopar tipo T no intervalo de 50 °C a 250 °C.

Ponto de calibração (°C)	Valor de referência (°C)	Valor do sensor (mV)	Erro (°C)
50	49,60	1,960	1,35
75	74,93	3,062	1,46
100	100,13	4,212	1,49
125	125,40	5,392	1,91
150	148,43	6,473	2,92
200	195,90	8,894	3,18
250	247,50	11,588	4,93

ANEXO A – Análise química da amostra de aço AISI H13



Ensaio
NBR ISO/IEC
17025

Laboratório de Ensaio e Análises em Materiais - LAMAT
Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Análise Química por Espectrometria Óptica -
Chemical Analysis by Optical Spectrometry - OPL 012670

Relatório / Report nº 14042/2

Solicitante: Alexandre Mendes Abrão
Endereço: E.E. UFMG - Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha
Materia: Amostra para análise
Identificação do Material: Aço - ABNT H13 - RECOZIMENTO
Identification by customer:

Elemento <i>Elements</i>	Concentração <i>Concentration</i>	Unidade <i>Unit</i>	Elemento <i>Elements</i>	Concentração <i>Concentration</i>	Unidade <i>Unit</i>
Carbono (C)	0,3500	%	Chumbo (Pb)	0,0015	%
Silício (Si)	0,9508	%	Estanho (Sn)	0,0051	%
Manganês (Mn)	0,3135	%	Arsênio (As)	0,0053	%
Fósforo (P)	0,0143	%	Zircônio (Zr)	ND	%
Enxofre (S)	0,0022	%	Bismuto (Bi)	0,0071	%
Cromo (Cr)	4,8898	%	Cálcio (Ca)	ND	%
Molibdênio (Mo)	1,653	%	Céριο (Ce)	0,0023	%
Níquel (Ni)	0,0950	%	Antimônio (Sb)	0,001	%
Alumínio (Al)	0,0282	%	Selênio (Se)	ND	%
Cobalto (Co)	0,0247	%	Tântalo (Ta)	ND	%
Cobre (Cu)	0,0860	%	Boro (B)	0,0004	%
Nióbio (Nb)	0,0111	%	Zinco (Zn)	0,0065	%
Titânio (Ti)	0,0037	%	Lantânio (La)	0,0009	%
Vanádio (V)	0,8464	%	Nitrogênio (N)	0,0091	%
Tungstênio (W)	0,0240	%	Ferro (Fe)	Balanceado	%

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente a reprodução de partes.
This report contains results referred exclusively to reproduction of parts.
 This report contains results referred exclusively to reproduction of parts requires written approval of the LAMAT.

Informações <i>Informations</i>
* Temperatura máxima do laboratório: 20°C <i>Maximum Laboratory Temperature: 20°C</i>
Procedimento: Método <i>Method: Method</i>
* Análise realizada segundo Instrução Técnica IT Lab 249 <i>Analysis performed according to Technical Instruction IT Lab 249</i>
* Normas: ASTM E 415:2014, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 515:2014 <i>Standards: ASTM E 415:2014, ASTM E 1086:2014 and ASTM A 515:2014</i>
Observações <i>Observations</i>
O equipamento analisa somente os elementos apresentados ao balanceamento da composição para cem por cento podendo detectar outros. <i>The equipment only analyzes the elements presented in the composition for hundred percent and may contain other undetected elements.</i>
* Onde consta ND (Não Detectado), significa que o resultado da faixa de detecção do equipamento é NQ (Não Quantificado). <i>Where ND (Not Detected) is mentioned, it means that the result is above the detection range of the equipment and NQ (Not Quantified) is above the detection range of equipment.</i>



Relatório / Report nº 14042/2

Equipamento Utilizado:
 * Método utilizado - Espectrometria de Emissão Óptica
Equipamentos / Equipments:
 * Espectrômetro de Emissão Óptica SPECTROMAXX identific
Optical emission spectrometer Spectromaxx, identification 15923

Element Element	Incerteza da Medição Uncertainty		
	+ / - U Uncertainty	95% Abrangência Coverage factor (K)	Graus de Liberdade Degrees of freedom (V _{eff})
C	0,0090	2,11	25,379
Si	0,0128	2	infinito
Mn	0,0023	2	infinito
P	0,0083	2	infinito
S	0,0019	2,06	39,464
Cr	0,0051	2,23	12,014
Mo	0,0101	2,25	11,678
Ni	0,0088	2,15	18,503
Al t	0,0032	2,05	57,907
Co	0,0032	2	infinito
Cu	0,0041	2,05	58,736
Nb	0,0063	2,14	19,18
Ti	0,0068	2,25	11,942
V	0,0025	2,16	17,034
W	0,0124	2	infinito
Pb	0,0007	2	infinito
Sn	0,0014	2,05	50,671
As	0,0056	2,2	14,54
Zr	0,0026	2,02	103,238
Bi	0,0006	2,13	42,46
Ca	0,0002	2	infinito
Ce	0,0002	2	infinito
Sb	0,0024	2	infinito
Se	0,0014	2,05	58,273
Ta	0,0042	2,15	18,171
B	0,0003	2,02	183,64
Zn	0,0002	2	infinito
La	0,0002	2,05	68,598
N	0,0019	2,11	23,62

* Esta foi a maior incerteza encontrada e foi obtida a tra combinada pelo fator de abrangência K (coeficiente de confiança de aproximadamente 95%)
uncertainty found and was measurement uncertainty combined by the coverage factor K (safe

Recepção 7/12/18

Analista
AnalystResponsável
Responsible

Realização 12/18

Jorge Henrique
LaboralistaPatrícia Resende
Laboralista - CRO

Emissão 17/12/18

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves F
Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filh

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corrêa
 Rua Lília Antunes, 99 - Bairro: Nogueira
 Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-240
 Página 2 de 2