



**CONCEPÇÃO, PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM
APARATO EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DE EMISSIVIDADE
DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA**

TADEU CASTRO DA SILVA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica**

**CONCEPÇÃO, PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM
APARATO EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DE EMISSIVIDADE
DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA**

TADEU CASTRO DA SILVA

ORIENTADOR: Prof. Dr. EDSON PAULO DA SILVA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS
MECATRÔNICOS**

Publicação: ENM.DM-82A/14

Brasília-DF, 16 de Dezembro de 2014.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

CONCEPÇÃO, PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTE DE UM APARATO EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DE EMISSIVIDADE DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

TADEU CASTRO DA SILVA

*Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia
Mecânica da faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília
como parte dos requisitos necessários para a obtenção
do grau de Mestre em Sistemas Mecatrônicos*

Banca Examinadora

Prof. Dr. EDSON PAULO DA SILVA, _____

ENM/FT/UnB

Orientador

Prof. Dr. ANTONIO PIRATELLI- FILHO, _____

ENM/FT/UnB

Examinador interno

Prof. Dr. DANIEL MONTEIRO ROSA, _____

ENM/FT/UnB

Examinador externo

Brasília- DF, 16 de Dezembro de 2014.

FICHA CATALOGRÁFICA

DA SILVA., Tadeu Castro.

Concepção, projeto, construção e teste de um aparato experimental para medição de emissividade de ligas com memória de forma. [Distrito Federal] 2014. xvi, 85p. 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2014).
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Emissividade

3. Medição de Temperatura

I. ENM/FT/UnB

2. Ligas com Memória de Forma

4. Termografia

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DA SILVA., Tadeu Castro. (2014). Concepção, projeto, construção e teste de um aparato experimental para medição de emissividade de ligas com memória de forma. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-82A/14, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 85p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Tadeu Castro da Silva.

TÍTULO: Concepção, projeto, construção e teste de um aparato experimental para medição de emissividade de ligas com memória de forma.

GRAU: Mestre

ANO: 2014.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

“Sabem o suficiente aqueles que sabem como aprender”.

Tadeu Castro da Silva

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela minha vida, aos meus pais (Cosme e Rosa) por todo incentivo e por mobilizar-se em prol da melhoria de minha vida, ao longo desses anos longe de casa.

Agradeço aos professores do curso de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos da UnB, em especial ao meu orientador, professor Edson Paulo da Silva, por inúmeras sugestões, incentivos e principalmente por assumir o desafio de orientar-me no que se refere ao desenvolvimento deste trabalho experimental, até então pouco explorado no âmbito acadêmico.

Agradeço ao aluno do curso de Engenharia Mecatrônica da UnB, Thiago Barra, que esteve comigo durante o desenvolvimento deste trabalho, compartilhando conhecimentos e dificuldades. E a todos os técnicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, especialmente aos Técnicos de Laboratório: Wesley Silva Valadares e Silmar Alves de Oliveira. Além de outros, entre os quais se destacam: Artur Alves Rocha, Marcos Roberto Pereira Silva. Obrigado pelo apoio, confiança e pelo incentivo.

À CAPES pelo suporte financeiro que me proporcionou melhores condições para o desenvolvimento deste estudo.

Ao Estado-Maior do Sexto Comando Aéreo Regional (EMCOMAR6), especialmente ao Major Brigadeiro do Ar Jorge Kersul Filho, pelas sábias palavras.

E a todos que, direto ou indiretamente, apoiaram o desenvolvimento deste trabalho e cumprimento do meu propósito acadêmico.

Tadeu Castro da Silva

RESUMO

CONCEPÇÃO, PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTES DE UM APARATO EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DE EMISSIVIDADE DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA.

Medir temperatura é de fundamental importância na caracterização termomecânica e em muitas aplicações de ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys - SMA*). A aplicação da termografia infravermelha é muitas vezes a técnica mais adequada ou a única possível para medir a temperatura de elementos com memória de forma, e essa medição depende do conhecimento da emissividade do material em questão. Tendo em vista que a emissividade depende das características superficiais do material, conhecer a emissividade de ligas com memória de forma se torna ainda mais importante, uma vez que ela pode variar com a mudança de fase do material, que é acompanhada por alterações na rugosidade da liga, o que por sua vez pode influenciar a emissividade e, conseqüentemente, o valor da temperatura medida, caso a devida correção da emissividade não seja feita. Vislumbrando estabelecer relações entre as transformações de fase martensíticas em ligas com memória de forma e emissividade, o objetivo do presente trabalho é conceber o projeto, construir e testar um aparato experimental que possibilite a medição da emissividade em ligas com memória de forma. O desenvolvimento do aparato experimental foi orientado pelas normas ASTM E1933-99 (Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers) e JIS A 1423 (Simplified test method for emissivity by Infrared Radio Meter) que estabelecem diretrizes para a medição de emissividade. O aparato desenvolvido utiliza sensores de temperatura infravermelhos ativos e passivos, na banda larga espectral de 8~14 μm e opera na faixa de temperatura de 25 °C até 120 °C. O ensaio foi executado sob vácuo de até 150×10^{-3} Pa. A funcionalidade e a eficiência do aparato foram avaliadas por meio da caracterização da emissividade de um material convencional (Aço 1020) e uma liga com memória de forma ($\text{Ni}_{55}\text{Ti}_{45}$). Os resultados obtidos em ambos são consistentes com dados disponíveis na literatura. A emissividade do aço manteve aproximadamente constante na faixa de temperatura considerada (25 a 100 °C), e a liga $\text{Ni}_{55}\text{Ti}_{45}$ em peso apresentou uma variação de 9,5% na emissividade entre o estado completamente martensítico e o completamente austenítico. Essa variação é explicada teórica e experimentalmente pela variação da rugosidade média da liga, que na fase martensítica é de 0,761 μm e na austenítica de 0,821 μm . Comparando os resultados obtidos com o aparato experimental e com um sensor de emissividade constata-se uma diferença de aproximadamente 4,2%. Assim, conclui-se que o aparato experimental desenvolvido atende aos propósitos para os quais foi concebido e possibilitará um aprofundamento da investigação da relação entre transformação martensítica e emissividade em ligas com memória de forma.

ABSTRACT

DESIGN, PROJECT CONSTRUCTION AND TESTING OF AN EXPERIMENTAL APPARATUS FOR MEASUREMENT OF SHAPE MEMORY ALLOY EMISSIVITY

Measurement temperature is of fundamental importance in thermomechanical characterization and in many applications of Shape Memory Alloy (SMA). The use of infrared thermography is often the most suitable technique or the only possible way to measure, the temperature of the shape memory element and this measurement depends on knowledge of the emissivity of the material in question. Given that the emissivity depends on the surface characteristics of the material, to know the emissivity of the shape memory alloy becomes even more important since it may vary with the phase change material, which is accompanied by changes in surface roughness of the alloy, which in turn can influence the emissivity and hence the value of the measured temperature if the correction of the emissivity is not made. Gleaming establish relations between the martensitic phase transformations in shape memory alloys and their emissivity, the aim of the present work is to design, build and test an experimental apparatus that enables the measurement of emissivity in shape memory alloys. The development of the experimental apparatus is guided by the standards ASTM E1933-99 (Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers) and JIS A 1423 (Simplified test method for emissivity by Infrared Radio Meter) which establish guidelines for measuring emissivity. The developed apparatus applies passive and active infrared temperature sensors in the spectral bandwidth of 8~14 μm and operates in the temperature range from 25 $^{\circ}\text{C}$ to 120 $^{\circ}\text{C}$. The measurements may be performed under vacuum of 150×10^{-3} Pa. The functionality and efficiency of the apparatus were evaluated by characterizing the emissivity of a conventional material (Steel 1020) and a shape memory alloy ($\text{Ni}_{55}\text{Ti}_{45}$ wt.%). The results of both are consistent with data available in the literature. The steel emissivity remains approximately constant over the considered temperature range (25 to 100 $^{\circ}\text{C}$), and the $\text{Ni}_{45}\text{Ti}_{55}$ in wt.% alloy emissivity changed in 9.5% between the fully martensitic state and the fully austenitic one. This variation is explained theoretically and experimentally by the roughness variation of the alloy, which in the martensitic phase is 0.7610 μm and in the austenitic one 0.8217 μm . Comparing the results obtained with the experimental apparatus and an emissivity sensor one notes a difference of approximately 4.2%. Thus, it is concluded that the developed experimental apparatus meets the purposes for which it was designed and so allow further investigation of the relationship between emissivity and martensitic transformation in shape memory alloys.

SUMÁRIO

Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Símbolos.....	xiv
Lista de Nomenclatura e Abreviações.....	xvi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	01
1.1 Contexto de Motivação.....	01
1.2 Objetivos.....	03
1.3 Metodologia.....	03
1.4 Estrutura do Trabalho	03
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
2.1 As ligas com memória de forma	04
2.2 Comportamento termomecânico da SMA	08
2.2.1 Quasiplasticidade.....	08
2.2.2 Pseudoelasticidade.....	09
2.2.3 Efeito Memória de Forma	09
2.3 Características superficiais das SMA	10
2.4 Rugosidade das SMA	12
2.5 Aplicações das ligas com memória de forma... ..	14
CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTOS DA RADIAÇÃO.....	15
3.1 Radiação eletromagnética	15
3.1.1 A radiação e o Espectro Eletromagnético	17
3.1.2 Intensidade da Radiação Eletromagnética	18
3.2 Poder emissivo e características emissivas do corpo negro	20

3.2.1	Lei ou Distribuição de Planck	20
3.2.2	Lei do Deslocamento de Wien	21
3.2.3	Lei de Stefan-Boltzmann	23
3.3	Propriedades radiantes das superfícies	23
3.3.1	Absortividade	24
3.3.2	Emissividade	25
3.3.3	Refletividade	26
3.3.4	Transmissividade	28
3.3.5	Lei de Kirchhoff	28
3.3.6	Considerações importantes sobre as superfícies	29
3.4	Métodos experimentais para medição da emissividade	30
3.4.1	Método Radiométrico	31
3.4.2	Temperatura de referência e modificação da amostra para corpo negro	32
3.4.3	Método calorimétrico e medidas da refletividade	34
CAPÍTULO 4– DESENVOLVIMENTO DO APARATO EXPERIMENTAL		36
4.1	Descrição geral sobre a concepção do aparato	37
4.2	Requisitos gerais do aparato experimental	39
4.2.1	Aquisição, Condicionamento e Análise de Sinais.....	40
4.2.2	Considerações sobre a Concepção do Vácuo.....	41
4.3	Projeto e especificação dos subsistemas	42
4.3.1	Especificações dos Materiais e Componentes.....	43
4.3.2	O projeto do Sistema de Aquecimento do Corpo de prova	45
4.3.3	Especificações dos Componentes do Sistema de Aquecimento	48
4.3.4	Especificações do Sistema de Medição de Temperatura	49
4.3.5	Aquisição de Sinais	52
4.3.6	Sistema de determinação da emissividade	53
4.4	Procedimentos Experimentais	55

4.4.1 Geometria dos Materiais Ensaiaados	55
4.4.2 Preparação dos Materiais Ensaiaados	56
4.5 Procedimentos para Ajustes	58
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
5.1 Emissividade do aço 1020	61
5.2 Emissividade da liga Ni₅₅Ti₄₅.....	63
5.3 Análise do efeito da rugosidade da liga SMA	68
5.4 Análise de incerteza experimental	70
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXOS	80
ANEXO 1. Curvas DSC da liga NiTi	81
ANEXO 2. Resultado da fluorescência de Raio X.....	82
ANEXO 3. Código fonte da tabela de linearização.....	83
ANEXO 4. Curva de calibração do termopar.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Evolução da fração volumétrica de martensita em função da temperatura.	04
Figura 2.2	Estruturas cristalinas das ligas NiTi.	05
Figura 2.3	Diagrama de fase das ligas NiTi.	06
Figura 2.4	Esquemático simplificado da transformação martensítica.	07
Figura 2.5	Curva tensão-deformação quasiplástica das SMA.	08
Figura 2.6	Curva tensão-deformação pseudoelástica das SMA.	09
Figura 2.7	Representação esquemática de efeito liga com memória de forma.	10
Figura 2.8	Micrografia da superfície de uma liga NiTi obtidas por microscópio Shimadzu SFT 9800 a) Austenita. b) Martensita.	11
Figura 2.9	Representação da reflexão da superfície de uma NiTi.	12
Figura 2.10	Rugosidade definida pelo parâmetro R_a .	13
Figura 2.11	Representação geométrica do fator de rugosidade.	13
Figura 3.1	Espectro da radiação eletromagnética.	16
Figura 3.2	Ângulo sólido correspondente a dA_n em um ponto sobre dA_1 no sistema de coordenadas esféricas.	18
Figura 3.3	Poder emissivo espectral do corpo negro.	22
Figura 3.4	Poder emissivo espectral para diferentes temperaturas.	22
Figura 3.5	Representação esquemática das reflexões difusa e especular.	27
Figura 3.6	Representação gráfica da radiação incidente em um objeto sólido.	29
Figura 3.7	Posicionamento dos sensores na amostra.	32
Figura 3.8	Esquemático do aparato para medição de emissividade.	33
Figura 4.1	Esquemático do aparato desenvolvido para medição da emissividade.	37
Figura 4.2	Aparato experimental para realização dos ensaios.	38
Figura 4.3	Diagrama de blocos do aparato desenvolvido para medição da emissividade.	39

Figura 4.4	Vista do sistema de produção de vácuo.	45
Figura 4.5	Desenho esquemático do sistema de aquecimento.	48
Figura 4.6	Fixação dos termopares no CP.	49
Figura 4.7	Conexões do sensor infravermelho.	50
Figura 4.8	Desenho esquemático do sensor infravermelho.	51
Figura 4.9	Vista do aparato utilizado para calibração dos termopares.	51
Figura 4.10	Vista do sistema em modo direto reflexivo.	53
Figura 4.11	Esquemático do sistema para determinação de emissividade.	54
Figura 4.12	Desenho esquemático dos CP's 1 e 3.	55
Figura 4.13	Foto do forno do DSC 8500.	56
Figura 4.14	CPs preparados com adesivo plástico.	58
Figura 5.1	Emissividade em função da temperatura do CP-3.	61
Figura 5.2	Curvas da emissividade em função da temperatura do CP-3.	62
Figura 5.3	Varição da emissividade hemisférica de alguns metais.	62
Figura 5.4	Emissividade hemisférica total em função da temperatura do CP-1.	64
Figura 5.5	Emissividade hemisférica total em função da temperatura do CP-1 durante o aquecimento.	64
Figura 5.6	Emissividade hemisférica total em função da temperatura do CP-2.	65
Figura 5.7	Emissividade hemisférica total em função da temperatura do CP-2 durante o aquecimento.	65
Figura 5.8	Emissividade hemisférica total em função da temperatura do CP-1 durante o resfriamento	67
Figura 5.9	Emissividade hemisférica total em função da temperatura do CP-2 durante o resfriamento.	67
Figura 5.10	Perfil medido e perfil R do CP-1 à temperatura ambiente.	68
Figura 5.11	Topologia superficial da NiTi. a) Austenita. b) Martensita.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Composições e temperaturas de transformação de fase das principais ligas com memória de forma.	06
Tabela 2.2	Resultados à temperatura ambiente e 100 °C.	12
Tabela 3.1	Divisão da radiação Infravermelha.	17
Tabela 4.1	Propriedades físicas da chapa.	44
Tabela 4.2	Especificações dos sensores infravermelhos.	50
Tabela 4.3	Propriedades da liga de NiTi fornecida pelo fabricante.	56
Tabela 4.4	Temperaturas características medidas via DSC.	57
Tabela 4.5	Resultado da Dureza Rockwell A dos CP's.	57
Tabela 4.6	Resultado da medição via Sonelastic®.	57
Tabela 5.1	Resultados de parâmetros de rugosidade do CP-1.	69
Tabela 5.2	Parâmetros de rugosidade calculados para o CP-1.	69

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A_s	Área da superfície	[m ²]
A_f	Temperatura final de formação da austenita	[°C]
A_s	Temperatura inicial de formação da austenita	[°C]
c	Velocidade da luz no meio	[m/s]
c_0	Velocidade da luz no vácuo=2,998 x 10 ⁸	[m/s]
C_1	Constante de radiação= $h \cdot c_0^2=0,59552137 \times 10^8$	[W.µm ⁴ /(m ² .Sr)]
C_2	Constante de radiação= $h \cdot c_0/k=14,38$	[µm.K]
C_3	Constante de radiação=2898	[µm.K]
C_{cp}	Calor específico do corpo de prova	[J/(kg.K)]
$d\omega$	Ângulo sólido diferencial	[Sr]
E	Poder emissivo total radiante	[W/m ²]
E_b	Poder emissivo do corpo negro	[W/m ²]
$E_{\lambda,b}$	Poder emissivo espectral do corpo negro	[W/(m ² . µm)]
F	Força aplicada	[N]
f_m	Índice de reflexão	
f_R	Fator de correção hemisférica.	
G	Radiação incidente ou irradiação	[W/m ²]
H	Constante de Planck=6,6260755 x 10 ⁻³⁴	[J.s]
I	Corrente elétrica	[A]
I	Intensidade da radiação	[W/(m ² .sr)]
I_b	Intensidade da radiação total emitida por um corpo negro	[W/(m ² .sr)]
$I_{\lambda,b}$	Intensidade da radiação espectral emitida por um corpo negro	[W/(m ² .sr)]
I_{λ}	Intensidade da radiação espectral	[W/(m ² . sr. µm)]
k	Constante de Boltzmann =1,380658 x 10 ⁻²³	[J/K]
k	Coefficiente de extinção	adimensional
L	Comprimento	[m] ou [mm]
M_f	Temperatura final de formação da martensita	[°C]
M_s	Temperatura inicial de formação da martensita	[°C]
n	Índice de refração no meio $n \equiv 1$ no vácuo.	

Pot	Potência elétrica ativa	[W]
P	Pressão	[Pa]
Q	Energia térmica	[J]
Q_{Conv}	Energia térmica dissipada por meio da convecção	[J]
Q_{Cond}	Energia térmica dissipada por meio da condução	[J]
Q_{rad}	Energia térmica dissipada por meio da radiação	[J]
Re'	Resistividade elétrica	[Ω/m]
S	Vazão aproximada sob vácuo	[l/s]
η	Número de onda	[cm^{-1}]
T	Temperatura	[K] ou [$^{\circ}C$]
T_0	Temperatura de equilíbrio termodinâmico	[$^{\circ}C$]
T	Tempo	[s] ou [ms]
V	Tensão elétrica	[V]
V	Volume	[m^3] ou [l]
V_{SMA}	Tensão elétrica no corpo de prova de SMA	[V]
α	Absortividade	adimensional
ε	Emissividade	adimensional
ρ	Refletividade	adimensional
ρ_{cp}	Massa específica do corpo de prova	[kg/m^3]
τ	Transmissividade	adimensional
λ	Comprimento de onda	[μm]
π	Constante trigonométrica=3,141592654	adimensional
σ	Constante de Stefan-Boltzmann = $5,67051 \times 10^{-8}$	[$W/(m^2.K^4)$]
σ_{CRIT}	Tensão crítica	[N/m^2]

SUBESCRITOS

Subescrito	Descrição
A	Refere-se a amostra.
abs, ref, tra	absorvida, refletida, transmitida
b	Refere-se a corpo negro
n	Normal
Tb_1, Tb_2	Refere-se a temperatura do corpo negro, antes e depois do aquecimento.

i, t	Refere-se a energia que incide e transpõe o material, respectivamente.
θ, φ	Direção angular (ângulos θ, φ).
λ	Espectral
$l, 2, T$	Refere-se as temperaturas do corpo negro e do não negro, respectivamente.

NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CP	Corpo de prova
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>
IR	Infravermelho
LMF	Ligas com memória de forma
PE	Pseudoelasticidade
<i>PTC</i>	Termistor de coeficiente de temperatura positivo
<i>NTC</i>	Termistor de coeficiente de temperatura negativo
SMA	<i>Shape Memory Alloys</i>
NITI	Nitinol
NOL	<i>Naval Ordnance Laboratory</i>
UV	Ultravioleta
RTD	<i>Resistance Temperature Detectors</i>
JIS	<i>Japanese Industrial Standard</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
<i>R_{ma}</i>	Resistividade da martensita
<i>R_a</i>	Resistividade da austenita

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O presente trabalho enquadra-se no contexto da caracterização de materiais inteligentes e tem como foco o desenvolvimento de uma bancada para a caracterização de emissividade de ligas com memória de forma. Apresentam-se neste capítulo o contexto e a motivação a partir dos quais estabelece-se os objetivos do trabalho, que serão buscados segundo as diretrizes metodológicas também aqui apresentadas. Por último é apresentada a estrutura do documento.

1.1 Contexto de Motivação

Nas últimas décadas o emprego de materiais inteligentes vem se intensificando fortemente (JANOCHA, 2007; GHANDI AND THOPSON, 1994; SRINIVASAN AND MC FARLAND, 2001; PONS, 2005; DOREY AND MOORE, 1995; SCHWARTZ, 2008). Em aplicações como atuadores que envolvem grandes deformações, cargas e baixas frequências as ligas com memória de forma apresentam um grande diferencial em relação aos demais tipos de atuadores (DELAURENTIS *et al.*, 2000). Nesse tipo de aplicação e em diversas outras não raramente é necessário medir a temperatura do elemento com memória de forma (HERVE, *et al.*, 2012).

Dependendo da forma de aplicação das ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys - SMA*), diferentes métodos de medição da temperatura podem ser necessários (UMEZAKI, 2006). Em alguns casos, diante da impossibilidade de se medir a temperatura por meio de métodos diretos, como a leitura de temperatura a partir de termopares, torna-se necessário o uso de métodos indiretos. Nesse caso, a termografia infravermelha é a técnica mais utilizada, uma vez que permite mapear a radiação térmica para medir e quantificar variações de temperatura remotamente (MARINETTI; CESARATTO, 2012; DELPUEYO *et al.*, 2011). Embora a termografia seja mais adequada nas análises térmicas não destrutivas, os resultados obtidos por meio dessa técnica são fortemente dependentes de fatores físicos relacionados às propriedades radiantes do material, principalmente da emissividade (DEL CAMPO *et al.*, 2010; MERIAUDEAU *et al.*, 1996). Nestes casos, é necessário o conhecimento da emissividade do material. Nas câmaras termográficas convencionais a emissividade é um parâmetro fixo e, quando ela varia com a temperatura é necessário que a emissividade seja ajustada ou ter-se-á um erro na temperatura medida (MARINETTI e CESARATTO, 2012).

Nos metais a emissão de radiação térmica pode ser analisada como um fenômeno de superfície, portanto, o desconhecimento da emissividade superficial pode restringir a aplicação ou comprometer a confiabilidade do método (HERVE, *et al.*, 2012). Estudos comprovam que a emissividade é influenciada pelas condições de superfície, por exemplo, rugosidade e oxidação, podendo ser específica para temperatura e banda do espectro infravermelho (MAYNARD, 2011). Nas ligas com memória de forma a rugosidade varia com a temperatura devido à transformação de fase que o material sofre quando submetido a determinadas temperaturas (SUTAPUN *et al.*, 1998; HUANG e ZHANG, 2002).

As SMA apresentam um comportamento fortemente dependente da temperatura em que se encontram, e podem, nos extremos, existir na austenita ou na fase martensita. Abaixo da temperatura característica M_f (temperatura final de formação da martensita) a fase termodinamicamente estável é a martensita e acima de A_f (temperatura final de formação da austenita) na fase austenítica (DELAEY *et al.*, 1974; OTSUKA e WAYMAN, 1998). A fase martensita é caracterizada por uma estrutura com diferentes variantes que pode ter até 24 orientações diferentes e quando solicitadas mecanicamente em determinados níveis de tensão são reorientadas em favor da variante mais favoravelmente orientada em relação à carga aplicada e, macroscopicamente, apresentam o comportamento quasiplástico (OTSUKA e WAYMAN, 1998). Já na fase austenítica o comportamento observado é a pseudoelasticidade (FUNAKUBO, 1987). Essas fases apresentam ainda características superficiais diferentes. A austenita possui uma topologia mais lisa do que a da martensita, que apresenta uma superfície caracterizada por uma rugosidade ligeiramente maior do que a austenita (HUANG e ZHANG, 2004).

Os materiais convencionais aplicados em engenharia possuem valores nominais de emissividade apresentados na literatura técnica. Porém, condições de superfície geralmente diferem em diferentes aplicações de engenharia influenciando a emissividade, afetando a transferência de calor por radiação. Nos metais, o valor da emissividade aumenta com a temperatura, rugosidade e grau de oxidação (MAKINO *et al.*, 1983) e diminui com o polimento superficial (INFRATEMP, 2010). Camadas de óxidos de poucos microns podem afetar a emissividade dos materiais (SIEGEL, 2002). Nas SMA as transformações de fase às quais estão sujeitas alteram as propriedades superficiais e, conseqüentemente, a emissão e reflexão da radiação (SUTAPUN *et al.*, 1998; HUANG e ZHANG, 2004). Essas variações de características superficiais entre fases podem influenciar também na medição termográfica de

temperatura devido à alteração da emissividade. Sendo assim, na determinação da emissividade hemisférica é importante escolher o instrumento capaz de medir a radiação em um comprimento de onda específico, e dentro de uma gama de temperaturas em que o material possua a maior emissividade possível, visto que grandes dificuldades são observadas na faixa de temperatura próxima à temperatura ambiente (PERIN, 2009).

1.2 Objetivos

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é conceber, construir e testar um aparato experimental que permita a medição da emissividade em ligas com memória de forma. O aparato deverá trabalhar na faixa de temperatura de 25 °C a 120 °C, nas bandas espectrais 8-14 μm e sob vácuo.

1.3 - Metodologia

As diretrizes metodológicas para desenvolvimento do aparato são definidas com base nas normas ASTM E1933-99 (2010) Sociedade Americana para Testes e Materiais (*ASTM-American Society for Testing and Materials*) e na norma Japonesa *Simplified test method for emissivity by Infrared Radio Meter JIS A 1423*. Tanto a norma Americana quanto a Japonesa definem requisitos para minimizar possíveis erros e para isso, os métodos descritos nessas normas requerem temperatura de pelo menos 10 °C acima ou abaixo da temperatura ambiente, assegurando estabilidade da diferença de temperatura entre corpo de prova (CP) e a temperatura ambiente durante os ensaios. São considerados dois métodos padrões de medição de emissividade apresentados nessas normas: um método por termômetro de contato e outro método por termômetro sem contato. O aquecimento do corpo de prova é realizado por meio efeito joule.

1.4 - Estrutura do trabalho

O trabalho é estruturado em 6 capítulos. O capítulo 2 apresenta basicamente uma revisão bibliográfica sobre o comportamento termomecânico das SMA geral e os conceitos fundamentais sobre radiação térmica, processos, propriedades e relações existentes são apresentados no capítulo 3. Também são abordados alguns métodos experimentais utilizados para determinação da emissividade. No capítulo 4 apresentam-se a concepção e projeto da bancada experimental e no capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados experimentais obtidos para uma liga.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo são apresentadas as ligas com memória de forma, suas propriedades termomecânicas, seu comportamento termomecânico e os conceitos fundamentais sobre radiação térmica, processos, propriedades e relações existentes.

2.1 As ligas com memória de forma

Dependendo da temperatura na qual se encontram, as ligas com memória de forma podem existir em diferentes fases: martensita, austenita ou uma mistura dessas fases. A Figura 2.1 representa esquematicamente a evolução da fração volumétrica de martensita em função da temperatura para as SMA quando aquecidas e resfriadas através das suas temperaturas de transformação de fase: M_s (*Martensite start*) temperatura inicial de formação da martensita, M_f (*Martensite finish*) temperatura final de formação da martensita, A_s (*Austenite start*) temperatura inicial de formação da austenita e A_f (*Austenite finish*) temperatura final de formação da austenita).

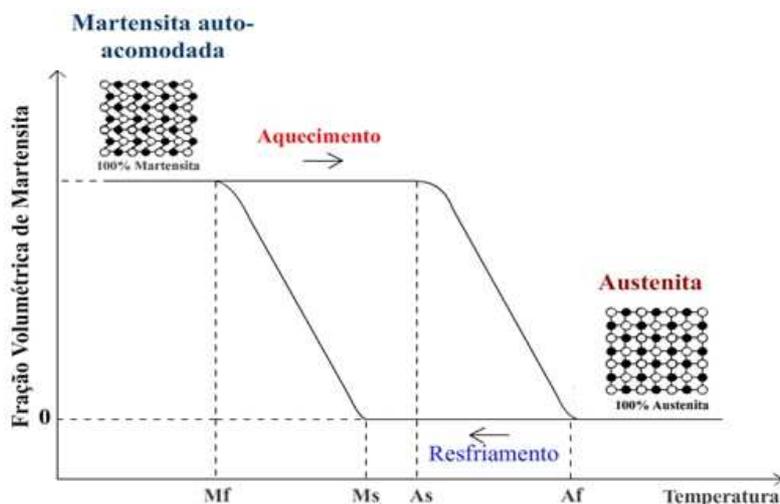


Figura 2.1 – Evolução da fração volumétrica de martensita em função da temperatura. (Da Silva, 2011).

Abaixo de M_f e livre de tensões o material apresenta uma estrutura totalmente martensítica. Quando aquecida a partir de uma temperatura inferior a M_f o material sofre uma transformação da fase martensítica para a uma fase austenítica a partir da temperatura A_s e é finalizada em A_f . Acima de A_f , o material está completamente austenítico. Com a diminuição na temperatura a partir de uma temperatura superior a A_f transformação da fase austenítica para

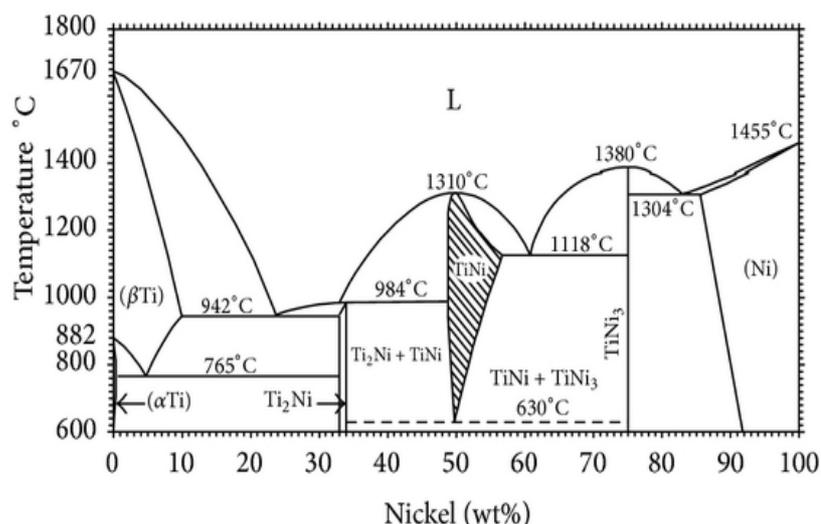


Figura 2.3 – Diagrama de fase de Ni-Ti em percentual atômico. (Otsuka e Ren, 2005).

Tabela 2.1 – Composições e temperaturas de transformação de fase das principais ligas com memória de forma (adaptado de Hodgson e Bierman, 1998).

Ligas	Composição (% peso)	Faixa de temperaturas de transformação (° C)
Ag-Cd	44/49 % Cd	-190 a -50
Au-Cd	46,5/50 % Cd	30 a 100
Cu-Al-Ni	14/14,5%Al, 3/4,5 %Ni	-140 a 100
Cu-Sn	~15 % Sn	-120 a 30
Cu-Zn	38,5/41,5% Zn	-180 a -10
Ni-Al	36/38 % Al	-180 a 100
Ni-Ti	49/51 % Ni	-50 a 110
Mg-Cu	5/35 % Cu	-250 a 180

A transformação martensítica é uma transformação da estrutura cristalina que envolve uma deformação por cisalhamento resultante do movimento cooperativo de átomos, e que resulta numa correspondência de rede entre a fase matriz e a fase martensítica. Nesta transformação existe uma correlação direta entre a estrutura da fase mãe (austenita) e a estrutura da fase produto (martensita). A Figura 2.4 representa esquematicamente o mecanismo da transformação martensítica termoelástica, que é fundamentalmente caracterizada por um movimento cisalhante cooperativo de átomos preservando uma correspondência cristalográfica entre as fases matriz (austenita) e produto (martensita), que no caso das SMA é ainda reversível

(termoelástica), contrariamente àquela observada nos aços que não é termoelástica, ou seja, não apresenta reversibilidade entre as estruturas das fases matriz e produto com a aplicação de temperatura (DELAEY *et al*, 1974; OTSUKA e WAYMAN, 1998; FUNAKUBO, 1987).

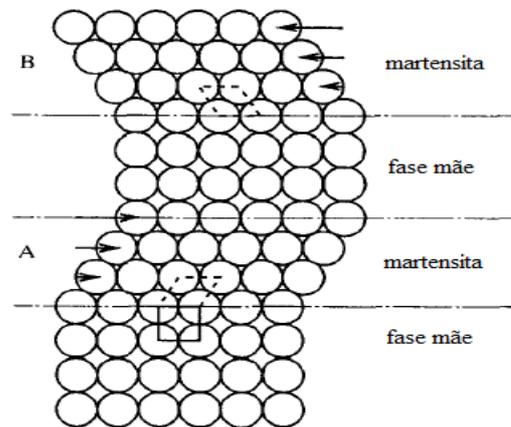


Figura 2.4 – Esquemático simplificado da transformação martensítica. (Otsuka e Wayman, 1998).

Os deslocamentos atômicos, causando a alteração da forma, é resultado da necessidade da estrutura cristalina de acomodar o estado mínimo de energia para uma dada temperatura (FUNAKUBO, 1987). Nota-se, na Figura 2.4, que os cristais na região A e na região B têm a mesma estrutura, porém orientações diferentes. Quando ocorre a diminuição da temperatura abaixo de uma temperatura crítica, inicia-se a transformação martensítica por um mecanismo cisalhante semelhante. Por outro lado, com o aumento da temperatura, a martensita torna-se instável, os mesmos cristais de martensita se transformam de volta em austenita.

Como esperado, uma vez que as estruturas cristalinas são diferentes, as SMA apresentam diferentes propriedades dependendo da fase em que se encontram. Destacam-se aqui o módulo de elasticidade da austenita que pode ser até três vezes o módulo da martensita (TURNER, 2001). A austenita também é superficialmente caracterizada por uma estrutura relativamente lisa com rugosidade na ordem de $9,336 \mu\text{m}$, já a martensita apresenta uma superfície com relevos e rugosidade na faixa de $10,000 \mu\text{m}$ (HUANG e ZHANG, 2002). As diferentes propriedades das SMA em função da temperatura resultam ainda em diferentes comportamentos. Basicamente, os principais comportamentos observados na SMA são a quasiplasticidade, a pseudoelasticidade e o efeito memória de forma.

2.2 – Comportamento termomecânico da SMA

A característica mais marcante das SMA é a sua capacidade de recuperar uma forma previamente estabelecida quando submetida a determinados ciclos termomecânicos por meio dos fenômenos da quasiplasticidade, da pseudoelasticidade e do efeito memória de forma.

2.2.1 – Quasiplasticidade

Quando abaixo de M_f e livre de tensões, as SMA existem na fase martensítica maclada, induzida termicamente pelo resfriamento da austenita. Quando essa estrutura é submetida a determinados níveis de tensão sofrerá uma reorientação da martensita maclada e martensita demaclada e tendo como consequência uma deformação denominada quasiplástica (aparentemente plástica). Se mantida abaixo de M_f essa deformação permanece, como se fosse uma deformação plástica (KRISHNAN *et al*, 1975). A Figura 2.5 representa esquematicamente a curva tensão-deformação quasiplástica. Inicialmente, observa-se um comportamento elástico da martensita maclada no trecho AB. Ao atingir uma tensão crítica σ_{crit} inicia-se uma reorientação das diferentes variantes de martensita maclada na direção daquela variante mais favoravelmente orientada em relação à carga aplicada e que se estende do ponto B ao ponto C, onde essa reorientação termina e o material se encontra na fase martensítica demaclada. A partir do ponto C observa-se um comportamento elástico da martensita maclada. A reorientação da martensita maclada em si não envolve deformação plástica e, desse modo, com o descarregamento anterior ao limite de escoamento da martensita, observa-se um comportamento elástico no trecho D-E e uma deformação residual denominada quasiplástica.

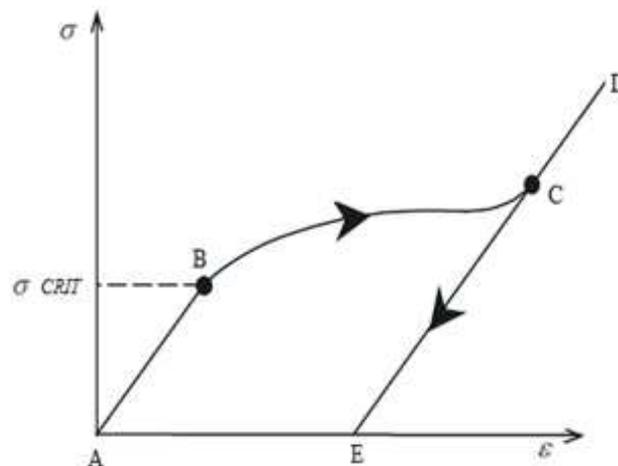


Figura 2.5 – Curva tensão-deformação quasiplástica típica das SMA - Esquemático.

2.2.2 – Pseudoelasticidade

Quando acima de A_f e livre de tensões as SMA existem na fase austenítica induzida termicamente pelo aquecimento da martensita. Quando essa estrutura é submetida a determinados níveis de tensão sofrerá uma transformação martensítica induzida por tensão, que é termodinamicamente instável acima de A_s e com a retirada da carga o material retorna à fase austenítica (KRISHNAN *et al*, 1975). A Figura 2.6 representa esquematicamente a curva tensão-deformação pseudoelástica típica. Inicialmente, observa-se um comportamento elástico da austenita no trecho AB. Ao atingir uma tensão crítica σ_{crit1} inicia-se uma transformação de fase martensítica induzida mecanicamente. Essa transformação termina no ponto C e sendo mantido o carregamento o material volta a se comportar elasticamente (trecho C-D). Com o descarregamento anterior ao limite de escoamento da austenita observa-se um comportamento elástico até o ponto E (σ_{crit2}) onde a transformação reversa para a austenita inicia-se. No ponto F essa transformação termina e o material volta à configuração inicial comportando-se elasticamente (KRISHNAN *et al*, 1975). Esse comportamento é denominado pseudoelástico, sendo elástico por retornar à configuração inicial e pseudo por descrever uma histerese.

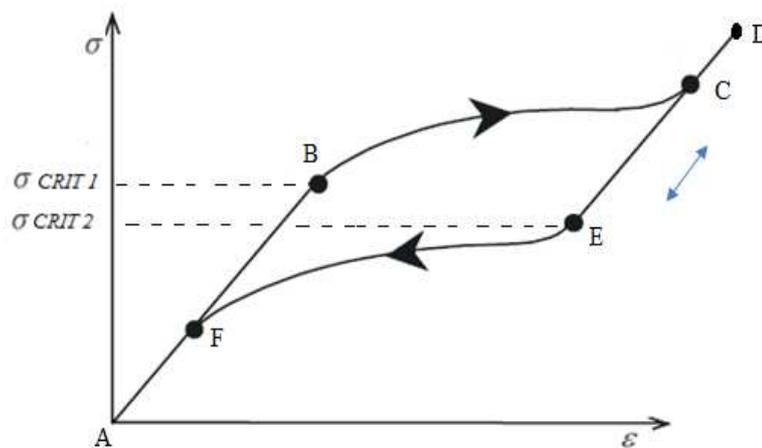


Figura 2.6 – Curva tensão-deformação pseudoelástica típica das SMA – Esquemático.

2.2.3 – Efeito Memória de Forma

O efeito memória de forma consiste basicamente da recuperação da deformação quasiplástica. A Figura 2.7 ilustra esquematicamente esse comportamento. Portanto, para que o material apresente o efeito memória de forma é necessário que ele seja, primeiramente, deformado quasiplasticamente (Figura 2.7a). Ao ser aquecido acima de A_f o material sofre a

transformação para a fase austenita e, macroscopicamente, o material assume a forma previamente estabelecida por um processo termomecânicos específico (Figura 2.7b). Ao o resfriado abaixo de M_f o material retorna à fase martensítica e, livre de tensões, mantém a sua forma geométrica (Figura 2.7c).

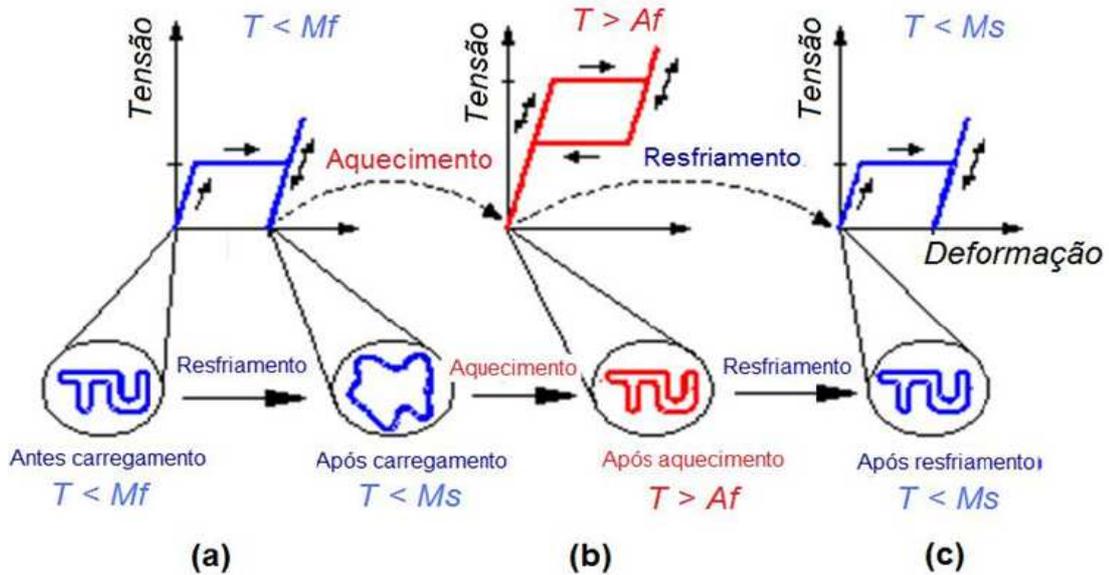


Figura 2.7 – Representação esquemática de efeito liga com memória de forma (Da Silva, 2011).

2.3 Características superficiais das SMA

As características superficiais de ligas com memória de forma não têm sido devidamente estudadas, de maneira especial as ligas NiTi (RYHÄNEN, 1999). Nesse aspecto, sabe-se que a superfície da liga NiTi é constituída em grande maioria de óxidos de titânio (TiO_2) e pequenas quantidades de óxido de níquel (NiO e Ni_2O_3) e Ni metálico (HANAWA, 1991; OSHIDA *et al.*, 1992; YAHIA *et al.*, 1996).

Os fenômenos envolvendo relevos superficiais é uma das características interessantes das ligas com memória de forma. Nesse sentido, alguns estudos foram realizados utilizando microscopia de força atômica de temperatura controlável para obter o perfil de uma SMA em diferentes temperaturas (HUANG e ZHANG, 2004). Esses estudos indicam que a reflexão da superfície de uma SMA depende fortemente da rugosidade e que o ângulo de incidência tem um ligeiro efeito sobre o ângulo de distribuição, formado entre a direção refletora real e normal. A Figura 2.8 mostra as imagens das características superficiais em temperaturas controláveis

de 100 °C (austenita Figura 2.8a) e na martensítica (Figura 2.8b) à temperatura ambiente (20 °C).

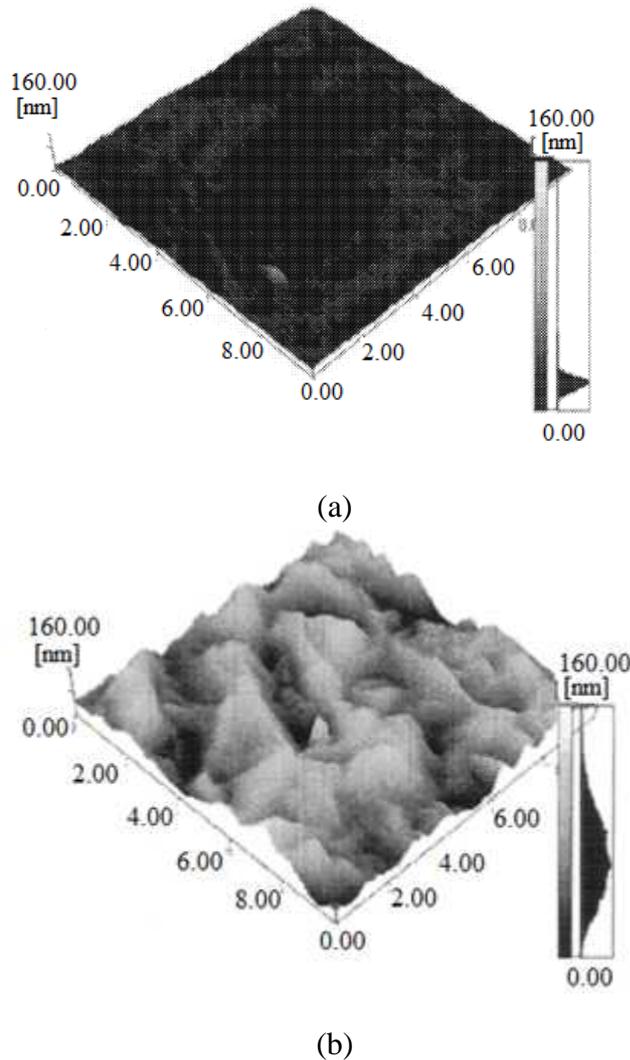


Figura 2.8 – Micrografia da superfície de uma liga NiTi obtidas por microscópio Shimadzu SFT 9800. a) Austenita. b) Martensita (Huang e Zhang, 2004).

Observa-se que as superfícies apresentam relevos bem diferentes entre si. A superfície lisa da fase austenita torna-se áspera com a mudança de fase. As mesmas observações foram feitas por (SUTAPUN *et al.*, 1998) e (HUANG e ZHANG, 2002) utilizando dispositivos micro-ópticos, como mostra a Figura 2.9. Na fase martensítica, Figura 2.9b, a superfície comporta-se como um emissor e refletor difuso, ou seja, maior quantidade de direções para emissão da radiação em razão da maior irregularidade superficial (rugosidade). Entretanto, quando a fase presente é a austenita, Figura 2.9a, a reflexão é regular, mantendo maior paralelismo durante a incidência dos raios e minimizando às direções de reflexão.

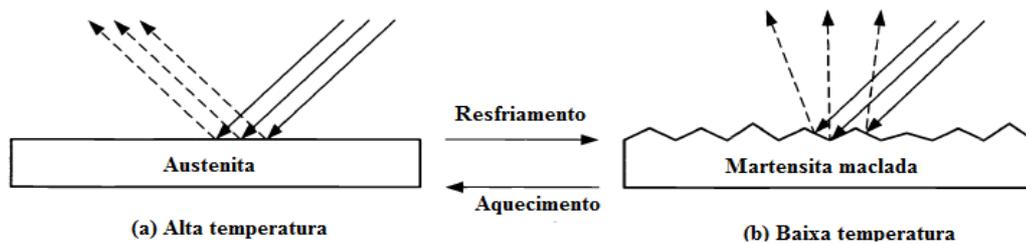


Figura 2.9 - Representação da reflexão da superfície de uma NiTi (Huang e Zhang, 2002).

2.4 Rugosidade das SMA

A rugosidade são as saliências e reentrâncias apresentadas pela superfície que está diretamente relacionada com o acabamento durante o processo de fabricação. Por isso, os parâmetros mais utilizados para avaliar a rugosidade são: R_a é a rugosidade média aritmética dos valores absolutos das ordenadas ao longo do perfil em relação à linha média (comprimento e altura), R_z é a média aritmética da amplitude dos cinco valores de rugosidade parcial, R_q que corresponde a rugosidade média quadrática e R_t que representa o pico máximo do vale e a distância no perfil.

Os principais parâmetros de medição de rugosidade de uma liga NiTi em diferentes temperaturas são apresentados na Tabela 2.2. As amostras foram polidas à temperatura ambiente e as medições foram realizadas em temperaturas estáveis através de um microscópio de força atômica utilizando uma configuração de 256 pixels nas direções X e Y (horizontal) e 4096 pixels na direção Z (vertical) (HUANG e ZHANG, 2004).

Tabela 2.2 – Resultados à temperatura ambiente e 100 °C (Huang e Zhang, 2004).

Amostra A	T = 20° C	T = 100° C
X	10,000 μm	9,336 μm
Y	10,000 μm	9,336 μm
Área	100,000 (μm^2)	87,16 (μm^2)
Média R_a	3,863 nm	4,198 nm
Média R_t	119,775 nm	45,525 nm
Média R_q	6,095 nm	5,297 nm

Embora nenhuma superfície seja totalmente difusa ou especular, a condição difusa por ser aproximada por superfícies rugosas, e a especular por superfícies polidas como espelho. A Figura 2.10 mostra graficamente o modo com o qual a valor de R_a refere-se a rugosidade da superfície.

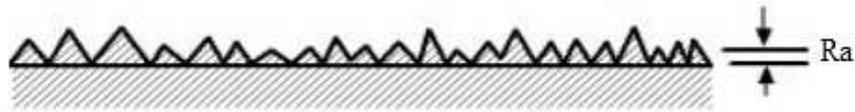


Figura 2.10 – Rugosidade definida pelo parâmetro R_a . (adaptado de Maynard, 2011).

Para superfícies ásperas utiliza-se o fator de rugosidade R . Esse fator é determinado pela equação 2.1 e pode ser aplicado para determinar propriedades radiantes das superfícies.

$$R = 1 + (\pi^2 n^2 \sigma^2)^{-1}, \quad (2.1)$$

onde n é o número de cruzamentos do perfil da superfície com o comprimento médio por unidade de linha média, σ é o desvio médio quadrático do perfil médio. Esse desvio pode ser expresso em relação a R_a pela equação 2.2 (WEN e MUDAWAR, 2006).

$$\sigma \approx 1,25R_a, \quad (2.2)$$

onde R_a é medido por um rugosímetro.

O fator R também é dado pela relação entre a área da superfície lisa (A_s) e a área da superfície rugosa (A_r). Como mostra a Figura 2.11, a rugosidade superficial local é modelada como uma depressão da área A_r e examina toda radiação que deixa a área equivalente A_s , tendo em vista todos os efeitos de reflexão a partir de superfície real de um corpo cinza difuso (AGABABOV, 1968).

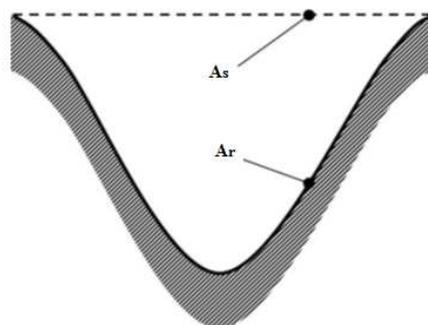


Figura 2.11- Representação geométrica do fator de rugosidade (Agababov, 1968).

Sendo assim, para corpo cinza a emissividade é igual à absorção, ou seja, ($\epsilon=\alpha$). Então, a emissividade efetiva da superfície pode ser determinada por meio da equação 2.3.

$$\epsilon_r = \left[1 + \left(\frac{1}{\epsilon_s} - 1 \right) R \right]^{-1}, \quad (2.3)$$

onde ϵ_r e ϵ_s são emissividade efetiva da superfície áspera e emissividade da superfície lisa, respectivamente.

2.5 Aplicações das ligas com memória de forma

As propriedades únicas das SMA são exploradas na solução de problemas de engenharia com maior ênfase à multifuncionalidade, acumulando aplicações que vão desde o monitoramento de integridade estrutural (sensores) até a confecção de estruturas adaptativas (OTSUKA e WAIMAN, 1998). Somente a variação de propriedades entre a martensita e a austenita possibilitam uma série de aplicações dessas ligas, podendo-se aqui destacar as aplicações em controle de vibração que exploram a variação do módulo de elasticidade com a temperatura (ŽAK, *et al*, 2003).

A primeira aplicação comercial das SMA ocorreu em 1971 no acoplamento de tubulações do jato F-14 *Tomcat* da marinha dos EUA (LAGOUDAS, 2008). Desde então, os estudos sobre SMA cresceram significativamente, permitindo aplicações no campo aeroespacial, naval e industrial com uso em juntas de tubos hidráulicos, conexões sem solda e instrumentos cirúrgicos (RYHÄNEN, 1999). Encontram-se na literatura diversos exemplos de ligas SMA, entretanto, a Ni-Ti é a liga preferida para maioria das aplicações que explora o efeito memória de forma.

A diversidade e intensidade das aplicações de ligas com memória de forma pode ser percebida pelos anais da *International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies* (SMST), que nos últimos quinze anos vem sendo realizada regularmente e tornou-se o principal fórum de discussão sobre as aplicações de SMA (SMST 2000, 2003, 2004, 2006, 2007, 2008, 2010, 2011, 2013, 2014).

CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTOS DA RADIAÇÃO

A transmissão de energia, por meio do espaço, é denominada de radiação. Esse processo pode se apresentar em formas de ondas eletromagnéticas (previsto pela teoria da onda eletromagnética) ou como parcelas de energia sem massa, chamado *fótons*, previstos pela mecânica quântica (MODEST, 2013).

O mecanismo da emissão de radiação está associado à energia liberada em função de oscilações ou transições dos elétrons que compõem a matéria e, portanto, todas as substâncias emitem naturalmente radiação eletromagnética em virtude da agitação molecular e atômica (INCROPERA e DEWITT, 2007; SIEGEL, 2002). No estado de equilíbrio, essa energia interna é proporcional à temperatura absoluta da substância e certamente ocorre mais eficientemente no vácuo.

A energia emitida por átomos internos dos sólidos é absorvida pelos átomos adjacentes. Em geral, os materiais sólidos e líquidos emitem, absorvem ou transmitem radiação térmica em razão de sua agitação atômica, e os fenômenos observados, quando a radiação se interage com os corpos, variam de acordo com o comprimento de onda incidente e esta com a temperatura do corpo (INCROPERA e DEWITT, 2007). Sendo assim, quanto maior a temperatura do corpo, maior será sua radiação e menor será o comprimento de onda associado (SIEGEL, 2002).

Diferentemente dos gases e sólidos semitransparentes, cuja emissão é um fenômeno volumétrico, a radiação térmica nos sólidos ou nos líquidos tem origem nos átomos localizados a uma distância de aproximadamente 01 μm da superfície exposta. Portanto, a energia emitida pelos sólidos e líquidos sob vácuo pode ser analisada como um fenômeno de superfície (INCROPERA e DEWITT, 2007).

3.1 Radiação eletromagnética

A radiação eletromagnética é caracterizada por ondas ou *fótons* que se propagam por meio de qualquer meio em alta velocidade (SIEGEL, 2002). Já que a luz visível corresponde a uma parte do espectro da onda eletromagnética, esta velocidade depende do meio por meio do qual se desloca e pode ser relacionada com a velocidade da luz no vácuo, (c_0) (MODEST, 2013). Essa relação é dada por

$$C = \frac{C_0}{n}, \quad (3.1)$$

onde n é o índice de refração no meio e $c_0 = 2,998 \times 10^8$ m/s. Por definição, $n \equiv 1$ no vácuo.

As ondas eletromagnéticas viajam mais lentamente por meio de dielétricos (não condutores elétricos), que têm índice de refração entre 1,4 e 4 aproximadamente e quase não penetram em metais que são bons condutores (MODEST, 2013). Existem ondas eletromagnéticas com grandes comprimentos de onda, tais como as ondas de rádio (AM/FM), TV(UHF/VHF) e radiações com comprimentos de onda bem pequenos, tais como as radiações-X e gama, (HALLIDAY, 2002). Cada onda pode ser identificada pela frequência ν dada pela equação 3.2.

$$\nu = \omega/2\pi = c/\lambda = c\eta, \quad (3.2)$$

onde λ é o comprimento de onda, c é a velocidade da luz no meio, η o número de onda e ω a frequência angular.

A Figura 3.1 mostra a representação do espectro de radiação eletromagnética, em que a radiação infravermelha localiza-se entre a região de radiação visível e a região das micro-ondas (MODEST, 2013; SIEGEL, 2002). Verifica-se que, quanto menor o comprimento de onda, maior será a frequência da radiação e maior será a quantidade de energia (INCROPERA e DEWITT, 2007; HALLIDAY, 2002).

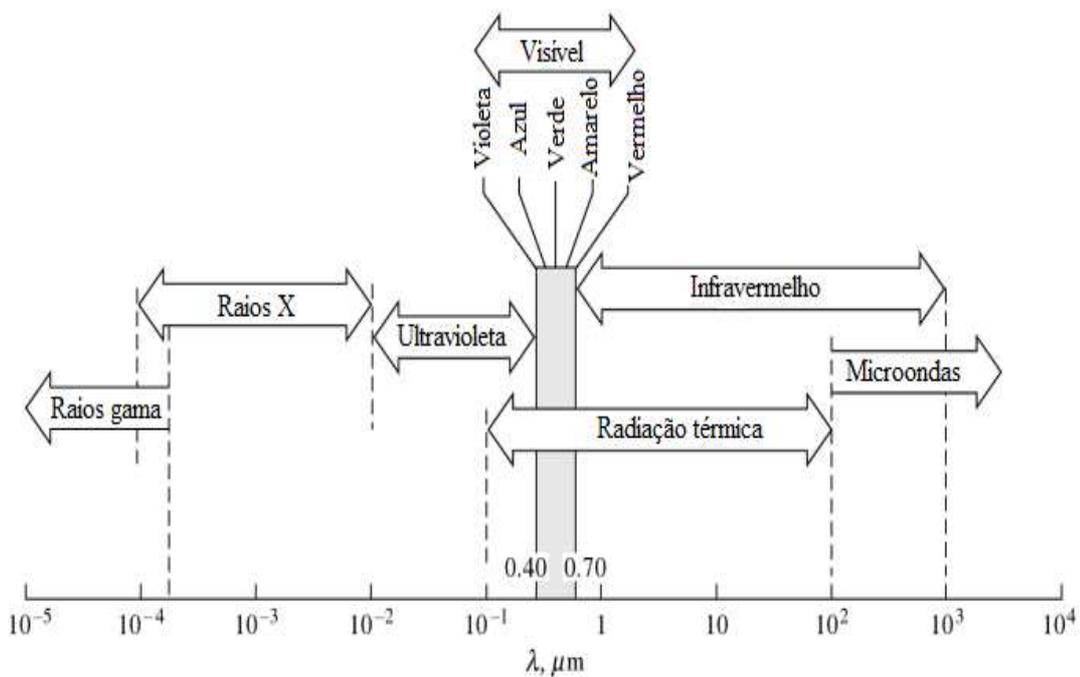


Figura 3.1 – Espectro da radiação eletromagnética (adaptado de Modest, 2013).

3.1.1 A radiação e o Espectro Eletromagnético

A palavra espectro (do latim "*spectrum*"), que significa fantasma ou aparição, foi usada por Isaac Newton, no século XVII, para descrever a faixa de cores que apareceram quando numa experiência a luz do Sol atravessou um prisma de vidro em sua trajetória (MALDAGUE e MOORE, 2001).

O espectro eletromagnético corresponde à faixa de frequências e respectivos comprimentos de ondas que caracterizam os diversos tipos de ondas eletromagnéticas. Cada faixa espectral apresenta características distintas. A radiação térmica, por exemplo, abrange uma faixa intermediária com comprimentos de onda de 0,1 até 100 μm e inclui parte da radiação ultravioleta (UV), a radiação visível e o infravermelho (IV). Devido a uma faixa extensa de frequência do infravermelho, existe uma subdivisão dessa radiação, como mostra o Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Divisão da radiação Infravermelha (adaptado de ABNT NBR 15572:2013).

Região	Faixa de λ
Infravermelho muito próximo	0,78 μm – 1,1 μm
Infravermelho próximo	1,1 μm – 3 μm
Infravermelho médio	3 μm – 6 μm
Infravermelho distante	6 μm – 15 μm
Infravermelho muito distante	15 μm – 1000 μm

As grandezas da radiação térmica são definidas da seguinte maneira: *Spectral*: uma grandeza que depende do comprimento de onda; *Total*: quando a grandeza espectral é integrada para todos os comprimentos de onda; *Direcional*: Quando depende da direção de propagação no espaço hemisférico (θ, ϕ); *Hemisférica*: quando a grandeza direcional é integrada em todo o espaço hemisférico.

A determinação da temperatura superficial de objetos pode ser realizada por meio da detecção da radiação infravermelha que se propaga no espaço nos comprimentos de ondas entre 0,75 μm e 1000 μm (10^{-6} m e 10^{-4} m). Tanto as magnitudes dessa radiação em todos os comprimentos de onda quanto a distribuição espectral variam de acordo com a temperatura e as características físicas da superfície emissora (INCROPERA e DEWITT, 2007). Para o estudo da radiação térmica emitida, idealizou-se o conceito de corpo negro. Um corpo negro possui refletividade nula para qualquer comprimento de onda, ou seja, independentemente de λ o corpo

negro não reflete nenhuma radiação. A radiação térmica de materiais metálicos é caracterizada por fatores como propriedades eletrônicas, efeitos de rugosidade da superfície e de camadas superficiais (MAKINO, 1983).

3.1.2 Intensidade da Radiação Eletromagnética

A radiação é emitida por todas as partes de uma superfície plana em todas as direções do hemisfério acima da superfície. A distribuição direcional da radiação (emitida ou incidente) normalmente não é uniforme (SIEGEL, 2002). Em razão disso, é necessário quantificar a amplitude da radiação emitida (ou incidente) para uma determinada direção no espaço (INCROPERA e DEWITT, 2007). Essa quantidade é a intensidade da radiação I que é definida com a energia emitida por unidade de área, por unidade de tempo, para um determinado ângulo sólido unitário e por unidade de área da superfície emissora projetada em função da direção θ (PERIN, 2009; KREITH, 1977).

Diferentemente de um corpo negro que possui emissão por unidade de área normal igual em todas as direções, uma superfície real possui emissão radiante dependente da direção e, portanto, é necessário quantificar sua intensidade (SIEGEL, 2002). Para analisar a emissão de radiação e entender o conceito de intensidade radiante, consideram-se os fenômenos associados às suas propriedades. Assim, a Figura 3.2 mostra um desenho esquemático de um sistema de coordenadas esféricas e a representação do ângulo sólido em um ponto dA_1 subtendido por dA_n .

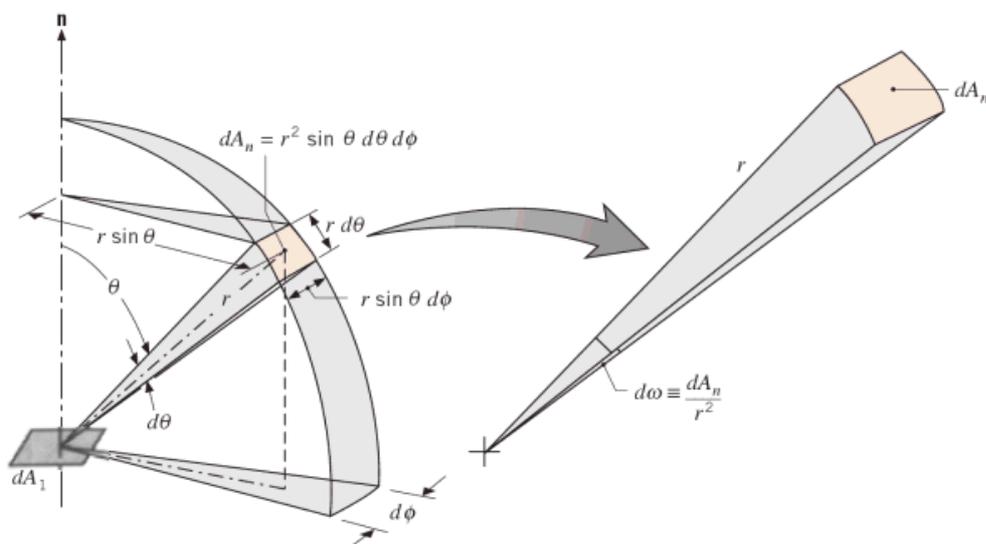


Figura 3.2 – Ângulo sólido correspondente a dA_n em um ponto sobre dA_1 em um sistema de coordenadas esféricas. (Incropera e Dewitt, 2007).

Associa-se à Figura 3.2 uma taxa de energia radiante denominada “ dq/dA_r ”, por unidade de tempo, e por unidade de área superficial, que passa sobre o ângulo sólido diferencial representado por “ $d\omega$ ”, formando uma inclinação com ângulo θ em relação à superfície emissora da radiação. Então, a intensidade é dada pela equação 3.3.

$$I = \frac{d^2q}{dA_n d\omega \cos\theta}, \quad (3.3)$$

onde ω é o ângulo sólido e $d\omega$ o ângulo sólido diferencial definido como a razão entre o elemento de área dA_n sobre a esfera e o quadrado de seu raio r .

Então,

$$d\omega \equiv \frac{dA_n}{r^2}. \quad (3.4)$$

Nota-se que a área dA_n é um retângulo de dimensões $r d\theta \times r \sin(\theta) d\phi$; sendo assim, $dA_n = r^2 \sin(\theta) d\theta d\phi$. Então, a equação 3.4 é definida por

$$d\omega \equiv \frac{dA_n}{r^2} = \frac{r d\theta r \sin(\theta) d\phi}{r^2}. \quad (3.5)$$

Substituindo-se e integrando-se no espaço hemisférico, obtém-se:

$$(q/A)_r = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} I(\theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi. \quad (3.6)$$

A superfície emite radiação térmica em determinadas direções, formando uma distribuição direcional e em uma faixa de comprimento de onda de composição espectral cuja amplitude é dependente da temperatura e das características de superfície (HERVE, *et al.*, 2012). A natureza espectral é uma característica usada para referir-se à dependência em relação a λ e à natureza direcional associada às suas características radiantes em relação à variação da direção. A intensidade da radiação é classificada como intensidade espectral I_λ que representa a radiação em um intervalo $d\lambda$ em torno de um único comprimento de onda ou a intensidade total I que combina todos os comprimentos de onda. Então:

$$I = \int_{\lambda=0}^{\infty} I_\lambda(\lambda) d\lambda. \quad (3.7)$$

3.2 Poder emissivo e características emissivas do corpo negro

O poder emissivo de um objeto qualquer é o produto da emissividade pelo poder emissivo do corpo negro que é definido como um objeto ideal absorvedor de toda a radiação incidente sobre ele, em qualquer comprimento de onda (SIEGEL, 2002). O poder emissivo pode ser classificado como poder emissivo espectral, $E_\lambda(\lambda)$, que se refere à emissão espectral em todas as direções possíveis ou então, como poder emissivo total E , definido em termos da emissão espectral em todas as direções e todos os comprimentos de onda possíveis.

O corpo negro como absorvedor e emissor perfeito é usado como padrão comparativo em relação às propriedades radiantes de superfícies reais. Para o melhor entendimento das definições sobre padrão de comparação para os corpos radiantes reais, é importante destacar as principais propriedades do corpo negro (INCROPERA e DEWITT, 2007):

- O corpo negro é capaz de absorver toda energia incidente sobre ele, independentemente do comprimento de onda e da direção;
- A radiação emitida por um corpo negro depende somente de λ e da temperatura. O corpo negro pode ser entendido como um emissor difuso perfeito;
- Possuem valor máximo de emissividade e absortividade = 1 ($\varepsilon = \alpha = 1$);
- Em qualquer λ , a intensidade de radiação emitida aumenta com a elevação de temperatura;
- Um corpo negro em um meio com índice de refração “ n ” tem poder emissivo total E_b relacionado pela lei de Stefan-Boltzmann (PERIN, 2009).

Existem três leis que descrevem o comportamento da radiação emitida pelo corpo negro: a lei ou distribuição de Planck, a lei do Deslocamento de Wien e a lei de Stefan-Boltzmann. A partir delas, calcula-se o poder emissivo total de um corpo negro conhecendo apenas sua temperatura.

3.2.1 Lei ou Distribuição de Planck

Em 1901, Max Planck formulou uma relação para radiação de corpo negro. Essa relação ficou conhecida como Lei de Planck e por meio da quantização da energia ela descreve a distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro em uma dada temperatura T , por

unidade de área e por unidade de λ (SIEGEL, 2002). A distribuição do poder emissivo espectral do corpo negro é expressa por:

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]}, \quad (3.8)$$

onde $C_1 = 2\pi hc_0^2 = 3,742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \frac{\mu\text{m}^4}{\text{m}^2}$, $C_2 = \frac{hc_0}{k} = 1,439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, T [K] é a temperatura absoluta da superfície, k [J/K] é a constante de Boltzmann = $1,380658 \times 10^{-23}$ [J/K] e h [J.s] a constante de Planck = $6,6260755 \times 10^{-34}$.

O gráfico da Figura 3.3 apresenta o resultado da distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro, dada pela Equação 3.8. Entretanto, essa equação é válida para superfícies no vácuo. Observa-se, na Figura 3.3, que a energia irradiada aumenta até um valor máximo e decresce à medida que λ aumenta. A partir da distribuição de Planck, é possível calcular $E_{\lambda,b}$ para determinados comprimentos de onda e determinar a temperatura T quando a capacidade emissiva é conhecida.

3.2.2 Lei do Deslocamento de Wien

A lei do deslocamento de Wien afirma que existe uma relação inversa entre λ que produz um pico de emissão de um corpo negro e a sua temperatura, (INCROPERA e DEWITT, 2007). Ao derivar a fórmula de Planck em relação ao comprimento de onda λ , e em seguida aplicar a resolução da mesma para o resultado máximo, exprime-se uma relação entre o comprimento de onda máximo $\lambda_{\text{máx}}$, para o qual a radiação emitida é máxima, e esse comprimento de onda depende da temperatura. A natureza dessa dependência pode ser encontrada derivando-se a Equação 3.9. Para $\lambda_{\text{máx}}$, T a solução é uma constante,

$$\lambda_{\text{máx}} T = C_3, \quad (3.9)$$

onde $C_3 = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ e equivale à terceira constante da radiação.

A equação 3.9 é conhecida como lei do deslocamento de Wien. As posições dos pontos são representadas no gráfico da Figura 3.4 por linhas pontilhadas. O resultado revela que o poder emissivo espectral máximo é inversamente proporcional a temperatura, deslocando para comprimentos de onda menores à medida que a temperatura aumenta (SIEGEL, 2002). Em

outras palavras, quanto maior a temperatura de um corpo negro menor o comprimento de onda na qual emite.

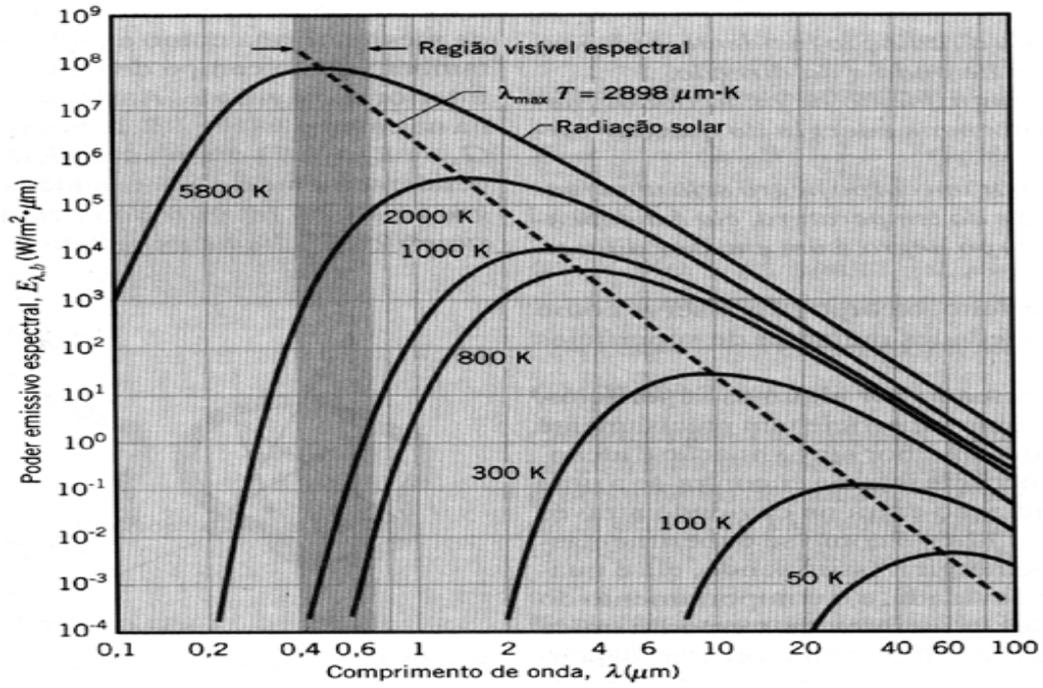


Figura 3.3 – Poder emissivo espectral do corpo negro (Incropera e Dewitt, 2007).

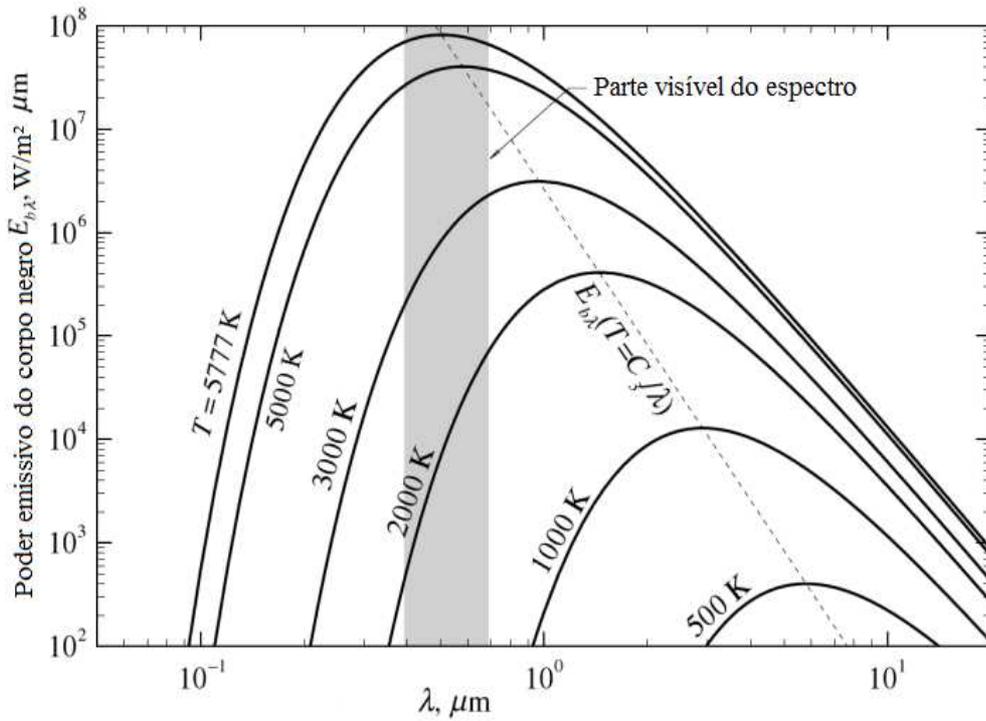


Figura 3.4 – Poder emissivo espectral em diferentes temperaturas. (Incropera e Dewitt, 2007).

3.2.3 Lei de Stefan-Boltzmann

Pela Lei de Stefan-Boltzmann, a energia total radiada por unidade de área superficial de um corpo negro por unidade de tempo (radiação do corpo negro) é diretamente proporcional à quarta potência da sua temperatura termodinâmica T . Ao integrar a fórmula de Planck sobre $\lambda = 0$ até $\lambda = \infty$, é possível obter o poder emissivo total radiante do corpo negro que é dado por:

$$E_b = \pi I_b = \int_0^{\infty} E_{\lambda,b}(\lambda) d\lambda = \pi \int_0^{\infty} I_{\lambda,b}(\lambda) d\lambda, \quad (3.10)$$

onde E_b [W/m²] é o poder emissivo hemisférico total do corpo negro, σ [W/(m².K⁴)] é a constante de Stefan-Boltzmann = 5,67051 x 10⁻⁸[W/(m².K⁴)] e T [K] é a temperatura absoluta. Resolvendo-se a Equação 3.10, a fórmula é dada por:

$$E_b = \sigma T^4. \quad (3.11)$$

O corpo negro possui emissão difusa, logo a intensidade da radiação emitida I_b é dada por:

$$I_b = E_b/\pi. \quad (3.12)$$

3.3 Propriedades radiantes das superfícies

Os conceitos acerca das propriedades radiantes de superfícies até agora referem-se a corpos negros. As superfícies reais, embora possam se aproximar do comportamento de um corpo negro, não apresentam as mesmas características em certas condições e comprimentos de onda ao longo do espectro (SIEGEL, 2002; ÇENGEL; GHAJAR, 2011).

A radiação térmica, ao contrário de condução e convecção, é um fenômeno de longo alcance (MODEST, 2013). O poder emissivo de superfície real é menor que a do corpo negro e assim, no desenvolvimento deste trabalho, é necessário realizar a caracterização de algumas propriedades radiantes, entre as quais se destacam a emissividade hemisférica, absorvidade, refletividade e a transmissividade, não esquecendo-se do fato de que o total de radiação no vácuo é um fenômeno de superfície, portanto pode ser analisada como uma função apenas da temperatura.

3.3.1 Absortividade

A absortividade α é uma propriedade radiante que determina a fração de energia incidente na superfície de um corpo que é absorvida por este. A absortividade α é definida como sendo a razão entre energia absorvida e energia incidente. Há dificuldade na determinação da absortividade, uma vez que ela pode ser caracterizada tanto pela dependência direcional quanto pela dependência espectral. Em uma superfície, a absortividade direcional espectral $\alpha_{\lambda\theta}$ (λ , θ , ϕ) é definida como uma fração da intensidade da radiação espectral incidente na direção θ e ϕ que é totalmente absorvida pela superfície (INCROPERA e DEWITT, 2007). Desse modo,

$$\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) \equiv \frac{I_{\lambda, i, abs}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda, I}(\lambda, \theta, \phi)}, \quad (3.13)$$

onde $I_{\lambda, i, abs}$ é a intensidade da radiação espectral totalmente absorvida e a $I_{\lambda, I}$ é a intensidade da radiação espectral incidente. Nessa relação, despreza-se a dependência da absortividade em relação à temperatura da superfície.

Normalmente trabalha-se com propriedades superficiais que representam médias direcionais. Sendo assim, a *absortividade hemisférica espectral* $\alpha_{\lambda}(\lambda)$ pode ser definida em termos da radiação incidente que é absorvida por intervalo de comprimento de onda como

$$\alpha \equiv \frac{G_{abs}}{G}, \quad (3.14)$$

onde $G_{\lambda, abs}$ é a radiação incidente absorvida pela superfície e G_{λ} a radiação incidente.

Nesse caso, α_{λ} é dependente da distribuição direcional da radiação incidente, do seu comprimento de onda e de aspectos físicos da superfície absorvedora. Por outro lado, a *absortividade hemisférica total*, α_{λ} , representa uma média total integrada em relação à direção e ao comprimento de onda. Nota-se que α é uma fração de energia total que é absorvida por uma determinada superfície e é definida por:

$$\alpha_{\lambda}(\lambda) \equiv \frac{G_{\lambda, abs}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)}. \quad (3.15)$$

Conseqüentemente, α é dependente da distribuição direcional da radiação incidente, do seu comprimento de onda e de aspectos físicos da superfície absorvedora.

3.3.2 Emissividade

A emissividade ε é definida como uma propriedade de superfície do material, e descreve sua capacidade em irradiar energia, em comparação com um corpo negro na mesma temperatura (SIEGEL, 2002). Para quantificar a energia radiante emitida por uma superfície, é preciso levar em conta todas as direções e comprimentos de onda (PERIN, 2009). Assim, definem-se quatro tipos de emissividade:

Emissividade direcional espectral $\varepsilon_{\lambda\theta}$ (ou simplesmente emissividade): é a razão entre a intensidade da radiação emitida no comprimento de onda λ na direção θ e ϕ , e a intensidade da radiação pelo corpo negro nos mesmos valores de T e λ (SIEGEL, 2002). Essa razão é dada por:

$$\varepsilon_{\lambda\theta}(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda b}(\lambda, T)}, \quad (3.16)$$

onde T representa dependência da temperatura.

A emissividade total direcional $\varepsilon_{\theta}(\theta, \phi, T)$ é a emissividade que considera todos os comprimentos de onda da radiação emitida pelo corpo a uma dada temperatura T . Define-se a emissividade total direcional como a radiação média emitida por todos os comprimentos de onda λ na direção θ e ϕ , e da radiação emitida pelo corpo negro nas mesmas condições. Essa relação é dada por:

$$\varepsilon_{\theta}(\theta, \phi, T) = \frac{\int_0^{\infty} I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\lambda b}(\lambda, T) d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} I_{\lambda}(\lambda, \theta, \phi, T) d\lambda}{\frac{\sigma T^4}{\pi}}. \quad (3.17)$$

A emissividade espectral hemisférica $\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T)$ é a emissividade integrada no espaço hemisférico e definida pela razão entre a radiação emitida no comprimento de onda λ considerando todas as direções θ e ϕ , e a radiação emitida pelo corpo negro nas mesmas condições. A Equação 3.18 representa essa relação.

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{1}{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \varepsilon_{\lambda\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi. \quad (3.18)$$

De modo semelhante, as outras propriedades, trabalha-se com as médias direcionais, e

portanto, a integração a emissividade espectral hemisférica é dada por:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{E_\lambda}{E_{\lambda b}}, \quad (3.19)$$

onde $E_{\lambda b}$ é a energia emitida por um corpo negro nas mesmas condições de T e λ .

Emissividade hemisférica total $\varepsilon(T)$ é a emissividade dada pela razão entre a emissão total do corpo emitida integrando todos os comprimentos de onda e sobre todas as direções θ e ϕ e a radiação emitida pelo corpo negro pela mesma temperatura. Assim,

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda(\lambda, T) E_{\lambda, b}(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^\infty E_b(\lambda, T) d\lambda}. \quad (3.20)$$

A Equação 3.20 pode ser simplificada para:

$$\varepsilon(T) = \frac{e(T)}{e_b(T)}, \quad (3.21)$$

onde $\varepsilon(T)$ é a emissividade total da superfície e $e(T)$ o poder emissivo do corpo cinza (W/m^2).

A emissividade hemisférica total $\varepsilon(T)$ é uma importante propriedade termofísica da transferência de calor por radiação, análises e medições térmicas em aplicações científicas e de engenharia (FU *et al.*, 2012). Os seus valores variam entre 0 (zero), refletor perfeito, e 1 (um), emissor perfeito ou corpo negro. Em superfícies metálicas, a emissividade é pequena, atingindo valores tão baixos quanto 0,02 para o ouro e a prata altamente polidos. Porém, a emissividade aumenta significativamente com o aumento da temperatura e também na presença de camadas de óxido (MAYNARD, 2011).

3.3.3 Refletividade

A refletividade ρ é uma propriedade que define a fração da radiação térmica incidente que é refletida por uma superfície, ou seja, a razão entre a energia refletida e a energia incidente. Define-se a refletividade direcional espectral de uma superfície $\rho_{\lambda\theta}(\lambda, \theta, \phi)$ como sendo a fração da intensidade da radiação espectral incidente na direção θ e ϕ que é refletida pela superfície. Essa relação é dada por:

$$\rho_{\lambda,\theta} = \frac{I_{\lambda, i, ref}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda, i}(\lambda, \theta, \phi)}, \quad (3.22)$$

onde $I_{\lambda, i, ref}$ é a intensidade da radiação espectral na direção θ e ϕ que é refletida. A refletividade hemisférica espectral $\rho_{\lambda}(\lambda)$ é definida como parte da radiação hemisférica espectral que é refletida pela superfície. Essa refletividade é dada por:

$$\rho_{\lambda}(\lambda) \equiv \frac{G_{\lambda, ref}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)}, \quad (3.23)$$

onde $G_{\lambda, ref}$ é a parte da irradiação hemisférica espectral refletida pela superfície.

A refletividade hemisférica total ρ_T é definida como a parcela da energia irradiante, (ou radiação incidente) que é refletida por uma superfície, conforme a Equação 3.24. Essa equação representa a média total em função da integração sobre a direção e o comprimento de onda.

$$\rho_T = \frac{G_{ref}}{G}, \quad (3.24)$$

onde G_{ref} é a fração da irradiação hemisférica total refletida por uma superfície.

As superfícies são consideradas difusas ou especulares dependendo da maneira como refletem a energia radiante. A reflexão nas superfícies lisas se aproxima da condição especular como ocorre com espelhos, enquanto superfícies com relevos mais rugosos tendem a ser mais difuso (SIEGEL, 2002). No caso de uma superfície difusa, a intensidade da radiação refletida não depende do ângulo de reflexão, como mostra a Figura 3.5. Contrariamente, se toda a reflexão tem ângulo θ_2 , igual ao ângulo de incidência θ_1 , denomina-se reflexão especular (INCROPERA e DEWITT, 2007).

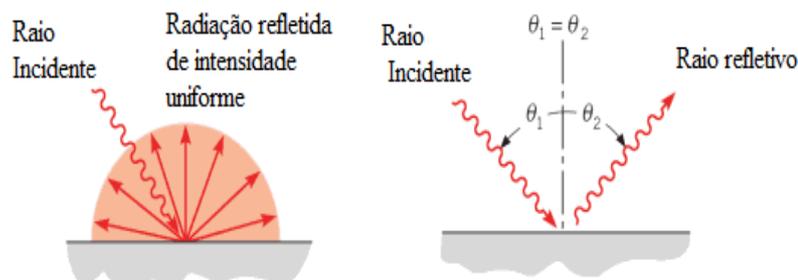


Figura 3.5 – Representação esquemática das reflexões difusa e especular (adaptado de Incropera e Dewitt (2007)).

3.3.4 Transmissividade

Um material semitransparente possui interações complexas com a energia radiante. Define-se a transmissividade τ como a parcela de energia incidente que atravessa o material:

$$\tau = \frac{E_t}{E_i}, \quad (3.25)$$

onde E_t energia que transpassa o material e E_i a energia incidente sobre o material. A transmissividade hemisférica total τ está relacionada com a componente espectral τ_λ e representa a fração da irradiação total que é transmitida por um material semitransparente. A relação que expressa a média total integrada sobre a direção e λ é dada por:

$$\tau(T) = \frac{G_{trans}}{G}, \quad (3.26)$$

em que G_{trans} é a energia que transpassa o material. Nos metais opacos $\tau(T)$ é nula.

3.3.5 Lei de Kirchhoff

A forma geral da lei de Kirchhoff estabelece relações entre a propriedade da emissividade e a absorvidade, como mostra a equação 3.27.

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) \equiv \alpha_{\lambda\theta}(\lambda, \theta, \phi), \quad (3.27)$$

onde $\varepsilon_{\lambda,\theta}$ é a emissividade espectral direcional e $\alpha_{\lambda\theta}$ é a absorvidade espectral direcional.

Em outras palavras, essa lei diz que a capacidade de um corpo em absorver energia incidente em um determinado λ à temperatura T e a capacidade deste corpo em emitir energia no mesmo comprimento de onda são equivalentes (SIEGEL, 2002). Entretanto, a lei de Kirchhoff pode ter restrições dependendo das distribuições radiantes. A Lei de Kirchhoff que não possui restrições é a forma direcional espectral dada pela equação 3.28.

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(T) = \alpha_{\lambda,\theta}(T). \quad (3.28)$$

Essa relação entre emissividade espectral direcional e absorvidade espectral direcional possui validade sem restrições, pois envolvem as propriedades direcionais espectrais que são

inerentes à superfície (INCROPERA; DEWITT, 2007). Contudo, é preciso considerar que as superfícies radiantes têm características distintas.

3.3.6 Considerações importantes sobre as superfícies

Para analisar propriedades radiantes de superfícies reais, é razoável considerar algumas aproximações. Contudo, há superfícies definidas como cinzas, as quais a absortividade e a emissividade espectrais (α_λ e ε_λ) não dependem de λ nas regiões espectrais da irradiação e da emissão, e outras superfícies denominadas de *cinza difusa* onde $\alpha_{\lambda\theta}$ e $\varepsilon_{\lambda\theta}$ não dependem de θ e λ . A superfície é difusa em razão da independência direcional e cinza devido à independência em relação a λ (INCROPERA e DEWITT, 2007).

A absortividade direcional espectral, emissividade direcional espectral e hemisférica total possuem valores iguais e a absortividade hemisférica total não depende da natureza da radiação incidente para superfícies cinzas difusas (PERIN, 2009). Tanto a absortividade direcional espectral quanto a emissividade direcional espectral não dependem de λ, θ, φ . Desse modo, $\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T_A) = \varepsilon(T_A)$, e $\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T_A) = \alpha(T_A)$. Assim, da lei de Kirchhoff para superfícies cinzas difusas tem-se uma relação dada por:

$$\varepsilon(T_A) = \alpha(T_A). \quad (3.29)$$

Quando a energia radiante de intensidade I_0 incide em um material sólido, uma parte da radiação é absorvida (α), refletida (ρ) e transmitida (τ) (PADILHA, 2007). A Figura 3.6 mostra a interação da radiação com o material sólido.

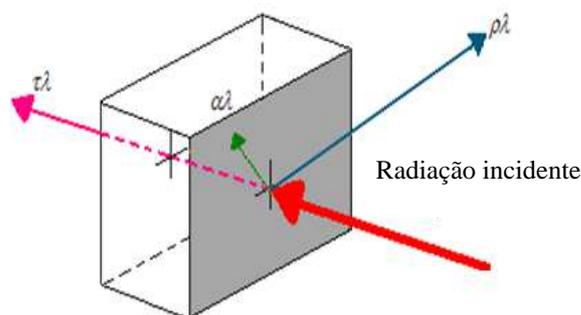


Figura 3.6 – Representação gráfica da radiação incidente em um objeto sólido.

Os materiais são denominados opacos, transparentes e semitransparentes em função de suas interações com a radiação. Em geral, os metais são opacos a todas as radiações

eletromagnéticas de alto comprimento de onda (rádio, TV, micro-ondas, infravermelho, luz visível e parte da radiação ultravioleta) e transparentes às radiações de baixo comprimento de onda (raio-x e raio γ) (PADILHA, 2007).

Com a soma das três parcelas da radiação incidente α , ρ e τ , pode-se realizar o balanço radiativo. Nos meios semitransparentes, esse balanço é realizado por meio das equações 3.30 e 3.31. A equação 3.30 corresponde as frações espectrais e a equação 3.31 as frações totais.

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1, \quad (3.30)$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1, \quad (3.31)$$

onde α é a absortividade, ρ a refletividade e τ é a transmissividade. Nos meios opacos não há transmissão, absorção e reflexão são processos superficiais, assim tem-se:

$$\alpha + \rho = 1. \quad (3.32)$$

3.4 Métodos experimentais para medição da emissividade

Medir e quantificar experimentalmente a emissividade de materiais é difícil em todas as temperaturas (PERIN, 2009). Isso se deve às dificuldades em manter o sistema de medição totalmente livre de atenuações atmosféricas e de efeitos causados por trocas de calor envolvendo outros mecanismos, além do mecanismo de transferência de calor dominante, a radiação (MAYNARD, 2011).

A literatura apresenta diferentes técnicas para determinação da propriedade emissividade. Entretanto, cada um deles possui correlações desenvolvidas sob diferentes condições. De modo geral, o valor da emissividade pode ser determinado a partir de medições calorimétricas, radiométricas direta e indiretamente por meio da reflexão (HERVE *et al.*, 2012; ASTM E1933, 2010; JIS A 1423, 1983).

Tanto a norma ASTM E1933 (2010), que especifica dois métodos para medir e compensar a emissividade superficial, quanto a norma ASTM E1962 (2010), que trata da medição e compensação da temperatura refletida, baseiam-se em medições experimentais radiométricas que aplicam métodos de sensores sem contato complementado por métodos de sensores por contato. No Brasil, a normalização vigente sobre o tema fica a cargo da norma ABNT JIS A 1423 (1983). Essa norma especifica um método simplificado de medição de emissividade para componentes da construção utilizando-se de termômetros de radiação infravermelhos.

3.4.1 Método Radiométrico

O método radiométrico é descrito pela norma ASTM E1933 (2010) como método de termômetro sem contato. Ele é caracterizado por técnicas não invasivas que utilizam sensores infravermelhos ou câmeras termográficas para medição da intensidade da radiação. Geralmente, sensores infravermelhos com ajustes na faixa de emissividade podem ser utilizados para determinação da emissividade superficial (PERIN, 2009).

Nas medições utilizando sensores infravermelhos, a intensidade da radiação emitida por uma superfície atravessa o meio até o elemento sensor do instrumento. Portanto, possibilitando que a radiação emitida seja somada à radiação do raio próximo, a reflexões e a possíveis interferências provocadas por fenômenos diversos (FU *et al.*, 2012; MAYNARD, 2011). Para evitar isso, as leituras de temperatura feitas por meio de sistemas de medição infravermelhos devem ser realizadas com a menor distância possível entre sensor e objeto medido, minimizando interferências decorrentes de efeitos provocados por fatores externos. Esse problema ocorre principalmente nas medições com superfícies de emissividade mais baixa, na ordem de $\varepsilon \sim 0,1$ (PERIN, 2009).

A maioria dos sensores infravermelhos e câmeras termográficas convencionais operam em bandas larga espectral de 8 a 14 μm , o que para medição de temperatura é uma vantagem, já que o ar atmosférico possui uma faixa espectral totalmente transparente entre ($\tau, \lambda 8\sim 14=1$) e pode ser considerado um meio não participante. No entanto, a medição de emissividade hemisférica para essa faixa deve ser evitada, principalmente em superfícies com propriedades radiantes espectralmente seletivas, ou seja, alta emissividade em uma determinada faixa e baixa emissividade em outra (PERIN, 2009; INCROPERA e DEWITT, 2007). A emissividade hemisférica é medida e integrada na faixa limitada entre 8 e 14 μm , conforme a equação 3.33.

$$\varepsilon(T) \equiv \frac{\int_8^{14} \varepsilon_\lambda(\lambda, T) \varepsilon_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda}{\int_8^{14} \varepsilon_b(\lambda, T) d\lambda} \quad (3.33)$$

Por outro lado, a emissividade hemisférica total é integrada para todo o espectro da radiação térmica entre 0,1 e 100 μm , podendo ser diferente da faixa específica utilizada na medição. Isso pode ser um problema maior quando a superfície possuir uma alta emissividade em uma determinada faixa e baixa emissividade em outra (PERIN, 2009; INCROPERA E DEWITT, 2007).

3.4.2 Temperatura de referência e modificação da amostra para corpo negro

A temperatura de referência e a modificação de parte da superfície a se comportar aproximadamente de forma ideal (corpo negro) são técnicas tradicionais para determinar a emissividade pelo método radiométrico, embora haja outros meios como refletômetros que medem a refletividade e possibilitam a estimativa da emissividade (HUILONG, 2010). Em ambos os casos, são utilizados instrumentos radiométricos para medir a radiação, ou ainda sensores radiométricos em conjunto com o método de temperatura de referência. Esse método utiliza-se de sensores diversos como termopares, termo resistências, termistores *NTC* (coeficiente de temperatura negativo) e *PTC* (coeficiente de temperatura positivo) para medir a temperatura. Entretanto, a leitura da temperatura de uma amostra está sujeita a erros que podem contribuir para desvios entre a medida e a temperatura do objeto (MICHALSKI *et al.*, 1991).

O resultado da emissividade é obtido de forma relativamente simples. Em primeiro lugar, determina-se adequadamente a temperatura da amostra por meio de um sensor de contato, em seguida mede-se a temperatura da amostra com sensor radiométrico ou câmera infravermelha e modifica-se a faixa de emissividade até que o resultado apresentado corresponda à leitura de temperatura do sensor de referência que está em contato com a superfície (MICRO-EPSON MESSTECHNIK GMB H & Co. KG, 2012).

A modificação da amostra para corpo negro é um método que consiste em utilizar um material de emissividade alta e uniforme ($\epsilon \geq 0,95$), para que uma parte da amostra apresente comportamento similar ao do corpo negro, como mostra a Figura 3.7. As medições são realizadas de forma indireta, ou seja, pela comparação entre quantidade de calor radiante, emitida pela parte de emissividade desconhecida, e a parte transformada em corpo negro de emissividade conhecida, à mesma temperatura T e no mesmo comprimento de onda λ .

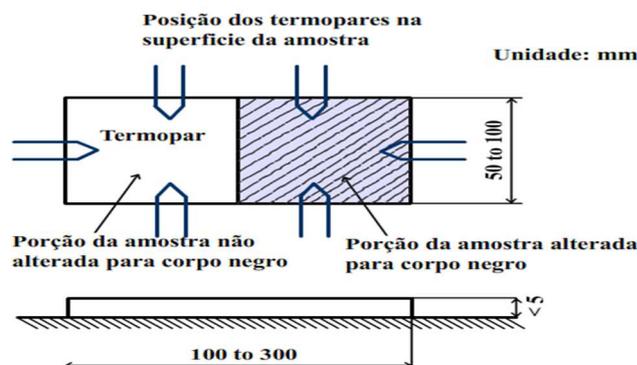


Figura 3.7 – Posicionamento dos sensores na amostra (JIS A 1423, 1983).

A literatura apresenta diferentes técnicas para transformar uma superfície em corpo negro, são elas: Utilizar-se de métodos semi-invasivos como adesivo plástico ou fitas isolantes de emissividade alta e conhecida para cobrir parte da superfície; Pintar parte da superfície com tinta preta ou tinta *sprays* de emissividade conhecida ou inserir cavidades no material para aumentar a emissividade aparente. Se a temperatura lida não ultrapassar 380 °C, é possível determinar a emissividade por meio de um adesivo plástico especial. Esse adesivo é usado para cobrir a superfície de medição e, após, define-se a emissividade com o valor conhecido e efetua a medição da temperatura. Em seguida, determina-se a temperatura da área não coberta pelo adesivo e ajusta-se a emissividade de acordo com o valor da temperatura sobre o adesivo.

A metodologia apresentada com utilização do adesivo plástico para determinar a emissividade também pode ser aplicada às tintas e fitas adesivas. No entanto, para que o método apresente resultados consistentes com o uso de fitas isolantes, é importante observar que a temperatura de aplicação seja menor que 260 °C e que a aplicação da fita isolante sobre a metade da superfície da amostra preencha o campo de visão do instrumento radiométrico (PERIN, 2009).

A norma JIS A 1423 (1983) apresenta o aparato experimental para determinação de emissividade na faixa de temperatura normal (100 °C), em que a amostra deve ser aquecida por um banho em fluido que eleve uniformemente e mantém a temperatura selecionada constante. A Figura 3.8 mostra esquematicamente o aparato experimental para determinação da emissividade.

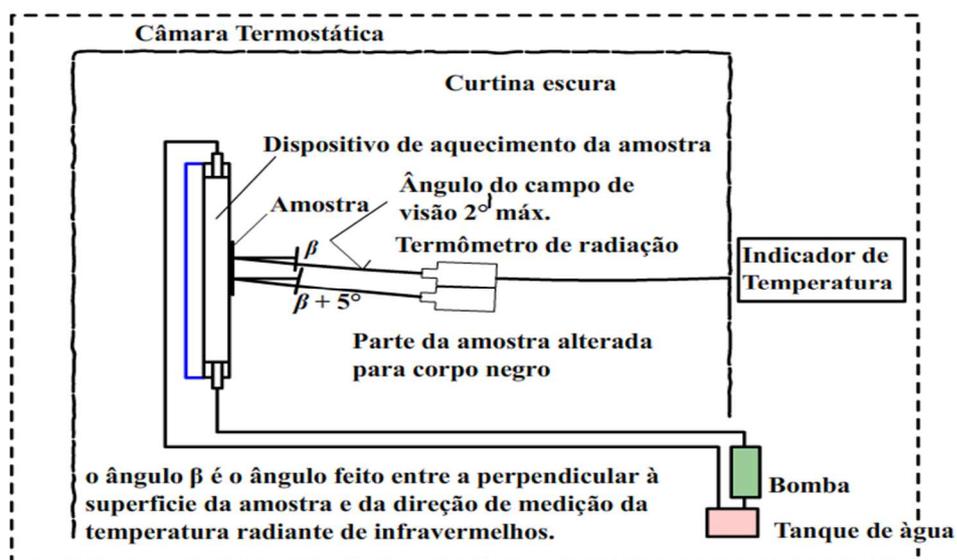


Figura 3.8 – Esquemático do aparato para medição de emissividade (JIS A 1423, 1983).

Uma câmara termostática é usada para manter a temperatura no seu interior uniforme com precisão de 0,5 °C na faixa de temperatura normal, enquanto o sensor de radiação infravermelha mede a quantidade de calor radiante da superfície da amostra. Ele deve ser capaz de medir em comprimento de onda de 8 a 13µm, ângulo inclinação máxima de 2° com relação à superfície normal e resolução de temperatura 0,2 °C ou maior.

A norma JIS A 1423 descreve dimensões, formato bem como dois métodos usados para determinar a emissividade. Um deles é pintar uma parte da amostra com tinta termocrômica preta ou similar com emissividade conhecida e superior a 0.95. Na outra parte, a temperatura da amostra é determinada por meio de seis sensores termoeletrônicos do tipo termopar acoplados por toda a sua extensão, e dois sensores infravermelhos. Um posicionado na parte original da amostra e outro na parte transformada em corpo negro.

Assegura-se que as temperaturas lidas na superfície da amostra e na câmara termostática não variam, atingido o equilíbrio térmico no interior da câmara, o procedimento consiste em medir, na temperatura ambiente:

1) A temperatura da porção original e da porção transformada em corpo negro com os termopares e com o sensor infravermelho apontado para a parte transformada em corpo negro com emissividade ajustada em 0.95. Certificar que as medidas do termopar e do sensor coincidem. Essa temperatura é registrada como T_{b1} .

2) Depois disso, medir a temperatura na porção original da amostra com o outro sensor infravermelho com emissividade ajustada em 1. Anote essa temperatura como T_1 . Usar o dispositivo de aquecimento para elevar a temperatura da câmara ao menos 10° C acima da temperatura ambiente. Repetir as medições como em 1 e 2, anotando T_{b2} na parte modificada para corpo negro e T_2 na parte não negra. A emissividade pode então ser calculada por:

$$\varepsilon = \frac{(T_2 - T_1)}{(T_{b2} - T_{b1})}. \quad (3.34)$$

3.4.3 Método calorimétrico e medidas da refletividade

Outro método para avaliação de emissividade baseia-se em pesquisas colorimétricas, em que o fluxo de energia é balanceado por um modelo analítico (PERIN, 2009). O sistema de medida calorimétrica é composto, basicamente, de uma cavidade esférica com vácuo interno, aquecedor controlado, sensores de temperatura e a amostra. O balanço de energia é feito sob

vácuo. Quando o equilíbrio é atingido, a potência fornecida para a amostra é perdida apenas por radiação, desprezando-se as perdas por condução e convecção para determinar a emissividade.

Outro método usado para determinar a emissividade baseia-se em uma propriedade diferente. O método usa a lei de Kirchhoff, para relacionar a emissividade com outra propriedade radiante que pode ser facilmente medida, a refletividade espectral por exemplo, que deve ser precisamente determinada (HUILLONG, 2010). Assim, a emissividade de uma superfície cinza difusa pode ser determinada por meio da equação 3.35.

$$\rho_{\lambda\theta} = 1 - \varepsilon_{\lambda\theta}. \quad (3.35)$$

CAPÍTULO 4 – DESENVOLVIMENTO DO APARATO EXPERIMENTAL

O aparato experimental foi desenvolvido para determinação da emissividade hemisférica total em função da temperatura. O aparato foi concebido com base nas normas JIS A 1423 e ASTM E1933-99a (2010) que tratam da medição da emissividade utilizando sensores infravermelhos. Segundo essas normas a emissividade é determinada para uma temperatura constante e de pelo menos 10 °C acima ou abaixo da temperatura ambiente. Por isso, algumas modificações na metodologia adotada pelas referidas normas foram necessárias, como por exemplo a adaptação do aparato para medir emissividade hemisférica total (integrada em 180°, no intervalo de $\theta = -90^\circ$ até $\theta = 90^\circ$) para superfícies cilíndricas.

A metodologia para determinação da propriedade de interesse, ou seja, a emissividade é baseada no método radiométrico e calorimétrico. O aparato possui uma faixa de temperatura operacional de 25 a 100 °C e é capaz de realizar medições diretas e indiretas de emissividade por meio de um sistema que utiliza um transmissor infravermelho ativo, em combinação com um detector com lente de foco fechado. Esse sistema detecta as variações da radiação emitida e refletida na superfície do CP e, se a emissividade mudar, a nova emissividade será determinada e transferida para os sensores.

O método calorimétrico permite determinar tanto a emissividade direcional quanto a emissividade hemisférica e baseia-se no conhecimento das quantidades dos fluxos (balanço) de energia térmica. Por isso, um sistema de vácuo foi desenvolvido para assegurar condições mais adequadas nas medições, além de possibilitar que o fluxo de energia térmica ocorra em determinadas direções de interesse, aumentando a repetitividade dos ensaios. Também foram utilizados outros recursos complementares tais como a compensação da temperatura ambiente, que é inserida nos sensores infravermelhos e uma cortina escura (*blackout*) cobrindo todo o sistema de medição.

As medições de temperatura foram realizadas em equilíbrio térmico por três termopares. A precisão nas leituras de temperatura foi melhorada, admitindo-se que as propriedades óticas da superfície alteram em função da temperatura e do perfil de rugosidade. Entretanto, uma desvantagem apresentada pelo sistema é o fim da vida útil da fonte de infravermelho que possui tempo de operação de cerca de 40.000 horas.

4.1 Descrição geral sobre a concepção do aparato

O aparato experimental é constituído de quatro subsistemas. A Figura 4.1 apresenta o desenho esquemático do aparato experimental concebido, juntamente com os instrumentos de medição e monitoramento. Ele foi dividido nos seguintes subsistemas:

- Geração e controle de vácuo;
- Sistema de aquecimento;
- Medição de temperatura;
- Aquisição, condicionamento e análise de sinais.

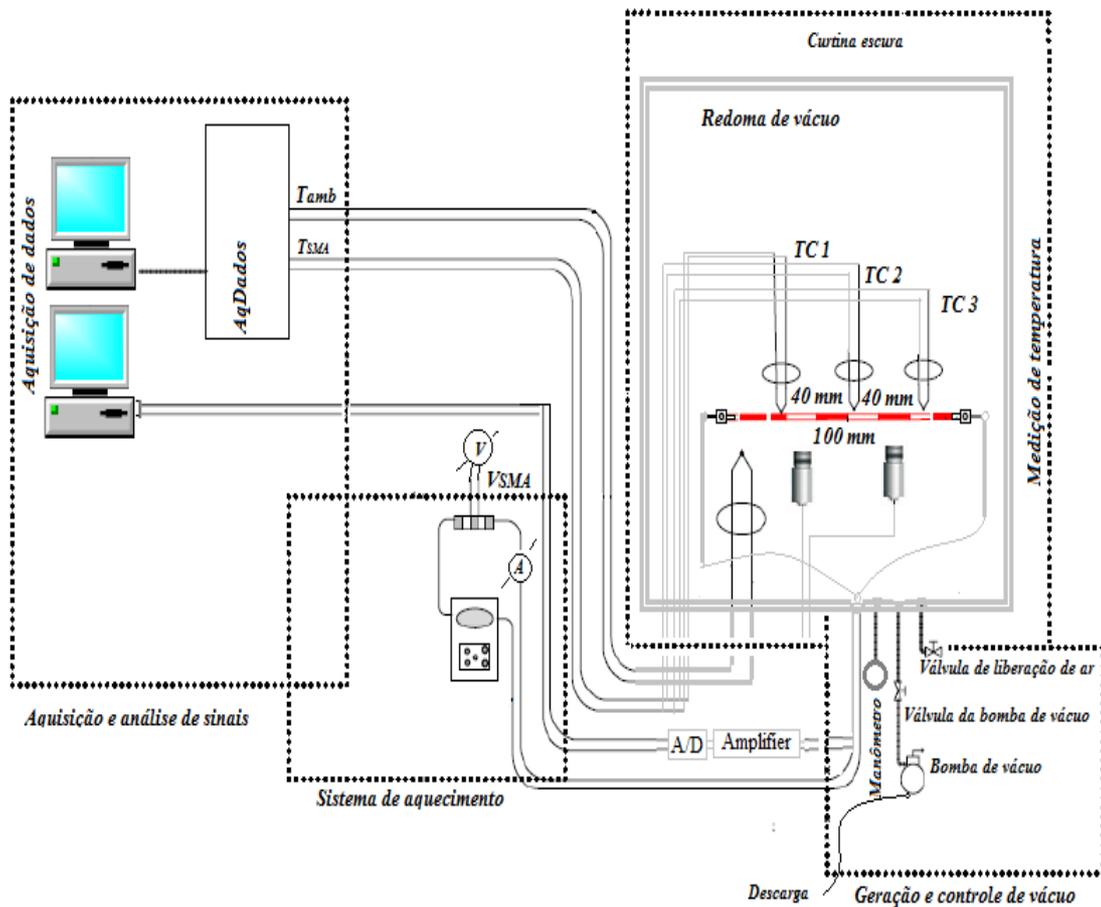


Figura 4.1 – Esquemático do aparato desenvolvido para medição da emissividade.

O aquecedor do CP baseia-se no aquecimento pelo efeito *Joule* e atende os requisitos fixados nas normas JIS A 1423 e ASTM E1933-99a (2013), sendo possível controlar a faixa de temperatura durante o aquecimento e resfriamento com flutuação igual ou menor que 0,1 °C. A metodologia para construção do sistema de produção de vácuo foi baseada na norma ASTM C-

835-06 (2013). A emissividade, nessas condições, pode ser obtida pela relação de Stefan-Boltzmann, dada por:

$$\varepsilon_1 = \frac{Q}{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)} \quad (4.1)$$

onde $Q = IV$ (W) é a taxa de fluxo de calor gerado na amostra, A_1 (m^2) a área total da secção superficial da amostra de teste e T_1 e T_2 as temperaturas da secção da superfície de teste e da parede sob vácuo respectivamente, e σ é a constante de Stefan-Boltzmann.

A Figura 4.2 mostra uma imagem do aparato experimental construído. De modo geral, os componentes de cada subsistema foram dispostos sobre a bancada e alguns cuidados foram tomados para evitar influência sobre os resultados obtidos na medição.

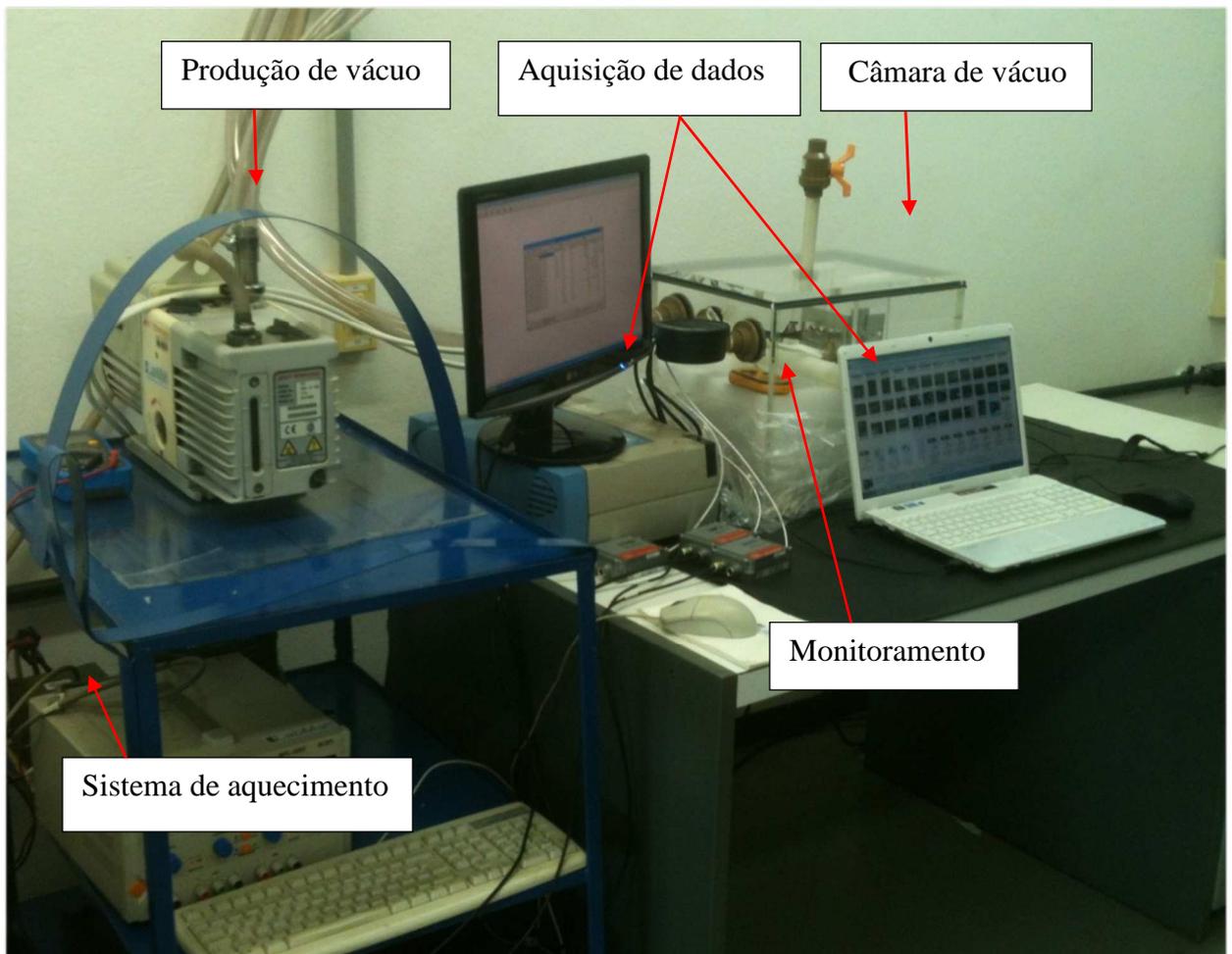


Figura 4.2 – Aparato experimental para realização dos ensaios.

As medições de temperatura foram realizadas por meio da utilização de três termopares, dois sensores infravermelhos na faixa espectral de 8 a 14 μm , que é mais recomendável maior transmitância e menor tempo de resposta para faixa de temperatura analisada (INFRATEMP, 2010). O diagrama de blocos com o fluxo de sinais do aparato experimental é apresentado na Figura 4.3.

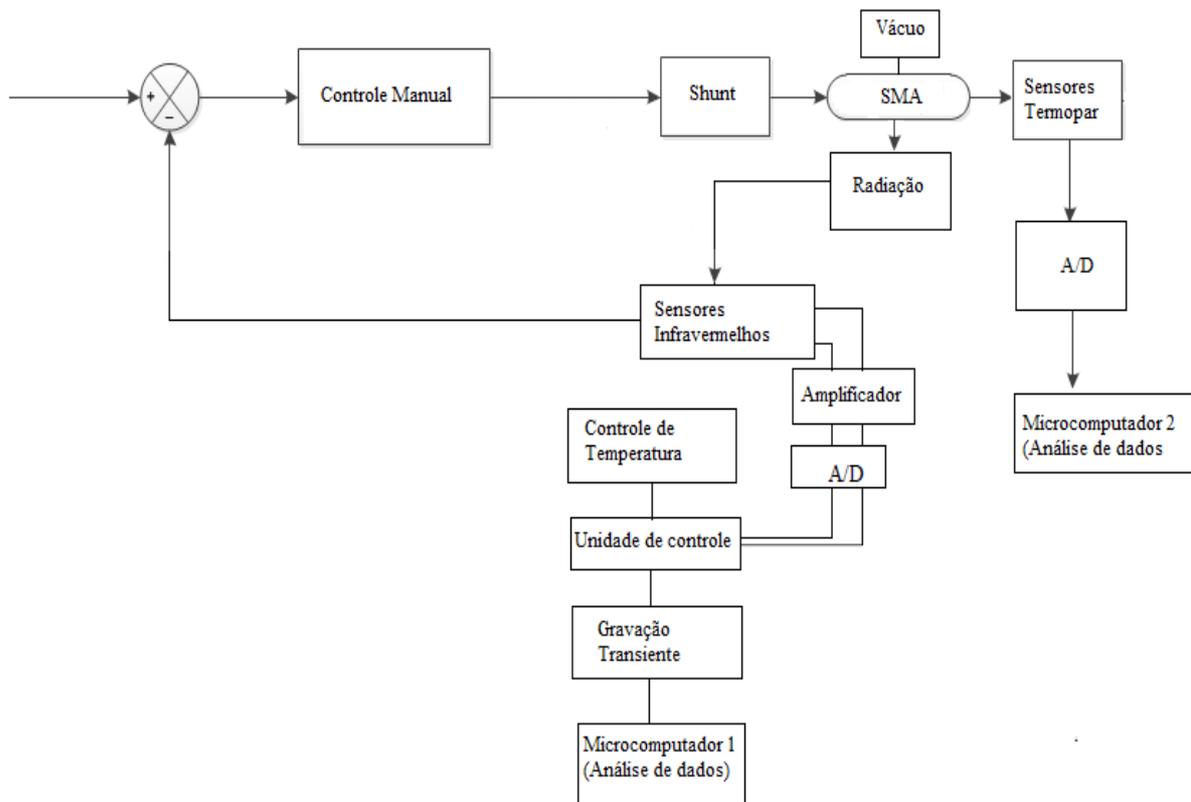


Figura 4.3 – Diagrama de blocos do aparato desenvolvido para medição da emissividade.

Na medição pelo método de contato, uma amplificação do sinal do termopar é realizada para que o mesmo se ajuste à faixa de entrada do conversor analógico digital A/D. Os sinais dessa medição são condicionados e analisados separadamente do sistema radiométrico.

4.2 Requisitos gerais do aparato experimental

O aparato desenvolvido é constituído por um conjunto de métodos e componentes que necessitam de requisitos mínimos para assegurar as condições de medição. Neste trabalho foram utilizados instrumentos de medição, monitoramento e equipamentos que atendiam todos os requisitos, como a faixa de temperatura, sensibilidade e precisão.

4.2.1 Aquisição, condicionamento e análise de sinais

Os termômetros infravermelhos foram definidos para leitura na faixa de 20 a 100 °C. Definiram-se os sensores para comprimentos de onda máximos, de acordo com a lei do deslocamento de Wien (Equação 3.8). Assim, tem-se a Equação 4.2 dada por:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{2898}{T}. \quad (4.2)$$

Substituindo-se $T = 293\text{K}$ e $T = 363\text{K}$ na Equação 4.2, obtém-se Equação 4.3.

$$\lambda_{m\acute{a}x_{293}} = 9,890 \mu\text{m}, \quad (4.3a)$$

$$\lambda_{m\acute{a}x_{363}} = 7,769 \mu\text{m}. \quad (4.3b)$$

O sistema de aquisição, condicionamento e análises de dados é constituído de dois *softwares* que necessitam de requisitos mínimos para funcionalidade adequada. O primeiro deles pode ser executado em diversos ambientes, embora nas medições do presente trabalho foi instalado e executado no ambiente *Windows XP* com a seguinte configuração do microcomputador:

- Processador Pentium (R)E2220 de 2.4 GHz;
- 01 GB de memória RAM;
- Monitor de vídeo com resolução de 1024x768;
- Disco rígido de 2GB de espaço para o armazenamento dos arquivos de aquisição;
- 50MB de espaço livre no disco rígido para instalação do programa;
- Placa A/D e/ou sistema de aquisição de dados da fabricante *Lynx* e suporte *AqDados 7*;
- Adaptador de rede Ethernet 10Mbits com conector RJ45 (10BaseT);
- Protocolo TCP/IP da Microsoft instalado para o adaptador de rede;
- Acessórios diversos de interface padrão, mouse e teclado;
- Porta USB;
- Chave *Hardkey*.

A aquisição dos dados de leitura de temperatura dos sensores teve início quando atingido equilíbrio (regime permanente) e foram validados os dados obtidos após o pré-aquecimento, ou seja, 10 °C acima da temperatura ambiente. Durante os ensaios (regime transiente), o controle de aquecimento e resfriamento foi feito por meio de incrementos gradativos de 0,1 V na tensão

devido ao procedimento temperatura máxima no CP fosse atingida em um curto intervalo de tempo e possibilitar ajustes

As variáveis correntes, tensão elétrica e pressão foram medidas e monitoradas constantemente. Após constatado, por meio do sistema de medição, que não havia oscilações significativas de temperatura ao longo do CP, as medições foram realizadas de maneira simultânea e independente pelo método de medição por contato (temperatura de referência), pelo método sem contato (modificação de parte da amostra para corpo negro) além do sistema de medição direta que utiliza um sensor ativo de infravermelho.

4.2.2 Considerações sobre a concepção do vácuo

O vácuo é definido tecnicamente como a pressão menor que a pressão atmosférica local ou ambiente. As aplicações do vácuo estão associadas às alterações dos valores de grandezas físicas como por exemplo, a densidade, tempo de formação de uma camada de moléculas em uma superfície e o fluxo de moléculas que incide em uma superfície. Nesse sentido, é de interesse a remoção de partículas moleculares que alteram as propriedades de superfície dos CPs. O principal motivo para utilização do vácuo é a alteração da atmosfera de medição para condições mais adequadas para o estudo da emissividade. Além de outros motivos, entre os quais se destacam:

- A remoção de gases quimicamente ativos na atmosfera do ambiente de vácuo;
- Evitar ou minimizar reações químicas (oxidações);
- Reduzir gases e vapores dissolvidos na superfície dos CP's;
- Reduzir a transferência de energia entre os meios. Pode-se ainda obter isolamento térmico ao eliminar o ar (meio semitransparente) entre a superfície do CP e o sistema óptico do sensor infravermelho;
- Obter superfícies mais limpas para o estudo da emissão de elétrons.

Os aspectos de projeto determinam a escolha adequada dos equipamentos do vácuo. Por isso, foram considerados os seguintes pontos ao conceber o sistema:

- Pressão final e pressão de trabalho;
- Comportamento geral dos gases em baixa pressão;
- Cálculo das condutâncias e velocidade efetiva de bombeamento;

- Definição da bomba de vácuo e acessórios;
- Características dos materiais empregados na construção do vácuo. Por exemplo, se haverá gases corrosivos ou explosivos;
- As superfícies da bomba que fazem contato com os gases bombeados devem ser isentas de cobre, zinco e cádmio;
- Os demais materiais usados na construção devem ser elastômeros à base de fluorcarbonetos, polímeros nitrílicos, silicones níquel e aço inox;
- A tubulação de admissão da bomba deve ser do tipo flexível para reduzir vibrações.

O vácuo foi construído com geometria retangular e pressão máxima de admissão 150 KPa. Ressalta-se que a remoção total das moléculas de um gás de um recipiente é uma tarefa praticamente impossível.

4.3 Projeto e especificação dos subsistemas

Em princípio, considerou-se o ar para dimensionar a geração de vácuo. A concepção desse sistema envolve a criação de uma diferença de pressão entre o meio interno e externo e consiste basicamente de:

- Câmara de vácuo;
- Bomba de vácuo;
- Linha (mangueira de vácuo).

Para atingir a pressão exigida (pressão absoluta), foi definida a bomba de vácuo, tubulação de conexão e a câmara. Por isso, foram determinadas as variáveis de pressão de vácuo, vazão e velocidade de bombeamento. No presente trabalho, não é desejável determinar a pressão em cada ponto da câmara de vácuo. Então, o valor da pressão média do vácuo foi calculada por:

$$P = \frac{F}{A}, \quad (4.4)$$

onde P é a pressão (Pa), F a força (N) e A a área (m²).

O cálculo das vazões aproximadas para sistemas com parâmetro de baixo vácuo pode ser realizado pela Equação 4.5 (MOUTINHO, *et al.*, 1980).

$$S = 2,3 \frac{V}{t_2 - t_1} \log \frac{p_1 - p_0}{p_2 - p_0}, \quad (4.5)$$

onde S é a vazão (l/s), V o volume da câmara de vácuo (l), $T_2 - T_1$ o tempo de geração do vácuo (s), $p_1 - p_0$ a pressão inicial atmosférica (mbar) e $p_2 - p_0$ a pressão final absoluta (mbar).

Dados as dimensões, foram calculadas a área da câmara, $A = 0,114 \text{ m}^2$, o volume $V = 0,0342 \text{ m}^3$ e, por meio da Equação 4.5, a força atuante 17,1 KN. Para isso, foi considerado 10 segundos de tempo para produção do vácuo, ou seja, tempo para retirada dos gases presentes na atmosfera da câmara e uma pressão atmosférica local de 895 hPa* Brasília—DF disponível em (<http://www.cepetec.inpe.br/>). Substituindo-se os dados na Equação 4.6, tem-se

$$S = 2,3 \frac{34}{t_2 - t_1} \log \frac{895}{545}, \quad (4.6)$$

$$S = 1,70 \text{ l/s}.$$

A vazão necessária para retirada do ar interior em um tempo de 10 segundos foi de aproximadamente 1,70 l/s (litros/segundo). Admitindo-se um cálculo simplificado e supondo a condutância constante, determinou-se a velocidade de bombeamento por meio da equação 4.7.

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{S_{bv}} + \frac{1}{C_t}, \quad (4.7)$$

onde S_{bv} é a velocidade da bomba de vácuo, S_{ef} velocidade efetiva de bombeamento e C_t a condutância total. Em alguns casos, a velocidade efetiva de bombeamento poderá ser uma função fortemente não linear.

4.3.1 Especificações dos Materiais e Componentes

Em relação às características dos materiais empregados na construção do vácuo, alguns cuidados foram necessários para assegurar condições adequadas de operação. Para a bomba com pressão de vácuo admissível de $1,5 \times 10^5 \text{ Pa}$ e vazão de 1,7 l/s, foi definido uma bomba mecânica tipo rotativa de palhetas com vedação a óleo, modelo RV8, código A654-01-905 da empresa Edwards. Essa bomba possui faixa de temperatura de funcionamento 7 a 40 °C que em

modo de vácuo elevado é capaz de alcançar nível de vácuo final cerca de 150×10^{-3} Pa e vazão de 3,25 l/s. Para linha de bombeamento, foi utilizada mangueira reforçada com diâmetro interno de 25 mm.

Para construção da câmara de vácuo, foi utilizada chapa termoplástica transparente de superfície lisa e uniforme, formando um recipiente hermeticamente fechado. As chapas usadas foram de 10 mm de espessura, tensão de ruptura de 70 MPa e módulo de elasticidade medido de 3670 MPa contra 3300 MPa da literatura (ACRÍLICOS BRASIL, 2010). Esse material foi escolhido devido às suas propriedades óticas, como a maior difusão da luz e absorção de taxa igual ou superior a 98% da radiação ultravioleta abaixo de 400 nanômetros. Além de outras propriedades diferenciadas que favorecem condições para que o sistema se comporte como um sistema isolado, tais como a isolamento térmica.

Na tabela 4.1, são apresentadas as propriedades físicas típicas da chapa empregada na confecção da câmara de vácuo, que teve as seguintes dimensões 380 x 300 x 300 mm de comprimento, largura e altura respectivamente.

Tabela 4.1 – Propriedades físicas da chapa (Acrílicos Brasil, 2010).

Módulo de Elasticidade	2800~3300 MPa
Coefficiente de condutividade térmica	0,195 W/m.K
Coefficiente de expansão térmica	0,000072 m/m -°C
Inflamabilidade (espessura 0,125")	25mm/min.
Transmissão de luz	92%
Índice de refração	1,49
Temperatura máx. uso intermitente	84 °C ou 357 K

Foram feitos três furos laterais na câmara para instalação dos adaptadores tipo flange de 32, 25 e 20 mm para conexão da tubulação da bomba de vácuo, passagem dos cabos de força e instrumentação, respectivamente. O vácuo foi medido por um vacuômetro instalado na placa base da câmara e a variação da pressão controlada utilizando uma válvula de vácuo manual.

A Figura 4.4 mostra o sistema de produção de vácuo. O formato retangular foi definido em virtude do posicionamento dos sensores de medição de temperatura. Para isolamento da câmara

de vácuo do ambiente e para garantir facilidade de acesso ao interior da câmara durante o desligamento da bomba, foi previsto uma tampa removível com válvula. Esse cuidado permite o controle da entrada de ar no interior da câmara e, conseqüentemente, o controle manual do nível de vácuo interno. Visando assegurar o vácuo máximo possível, as bordas da câmara foram devidamente vedadas utilizando borracha de isoprene. Com essas medidas, o vácuo final máximo obtido foi de 150×10^{-3} Pa.

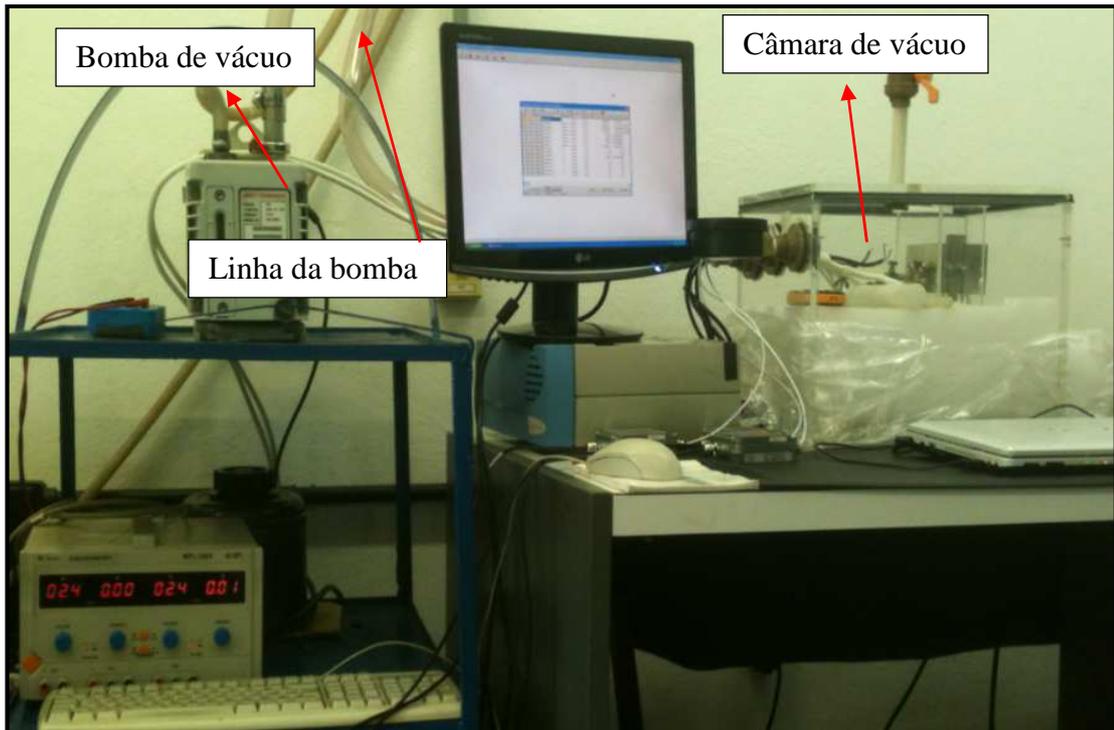


Figura 4.4 – Vista do sistema de produção de vácuo.

4.3.2 O projeto do sistema de aquecimento do corpo de prova

Definiu-se a utilização do método de aquecimento por efeito *Joule* da corrente baseando nos estudos de (LUSSI, 2009). A energia térmica na barra pode ser balanceada levando-se em conta a dissipação por qualquer um dos três modos, condução, convecção e radiação. A parcela de energia dissipada pode ser determinada pela equação 4.8, se a energia fornecida e as dissipações térmicas são conhecidas:

$$VI = Q_{Conv} + Q_{Cond} + Q_{Rad}, \quad (4.8)$$

Onde VI , é a energia fornecida à barra se SMA, Q_{Conv} a energia dissipada por meio da convecção, Q_{Cond} é a energia dissipada por meio da condução e Q_{Rad} é a energia dissipada para o meio por radiação.

As perdas de energia Q_{Cond} e Q_{Conv} , ao longo do comprimento da barra de SMA, são insignificantes, em comparação com a perda de calor por radiação (MAYNARD, 2011). A energia que deixa a superfície sob a forma de calor por radiação Q_{rad} devido à diferença de temperatura entre SMA e o meio ambiente pode ser expressa por:

$$Q_{rad} = \varepsilon\sigma(A_s)(T_{Sma}^4 - T_{\infty}^4), \quad (4.9)$$

Onde ε é a emissividade do CP, $\sigma=5,6704 \times 10^{-8}$ [W/m²K⁴] é a constante de Stefan-Boltzmann, A_s a área da superfície do CP dado por $A_s = \pi \cdot D \cdot l$ (m²), T_{Sma} T_{Sma} é a temperatura da barra SMA (K) e T_{∞} a temperatura do meio adjacente (K).

No vácuo e em estado estacionário, a potência elétrica fornecida para o aquecimento da barra de SMA é aproximadamente igual a dissipação de calor a partir da superfície do CP por radiação. Então,

$$Q_{rad} \equiv VI_{v\u00e1cuo}. \quad (4.10)$$

Conhecidas a potência a ser fornecida, a radiação e desprezando-se as perdas, determina-se a corrente fornecida pelo sistema elétrico pela equação 4.11.

$$\dot{E}_{vi} = I^2 R_e' L, \quad (4.11)$$

onde I é a corrente e R_e' a resistividade elétrica do CP. A variação interna de energia devido a mudança de temperatura e outras interações macroscópicas que definem o estado termodinâmico do material, é determinada por:

$$\dot{E}_{acu} = \frac{d_{Ut}}{dt} = \frac{d}{dt}(\rho V c T), \quad (4.12)$$

onde \dot{E}_{acu} é a taxa de variação na energia térmica interna do CP, ρ e c a massa específica e calor específico, respectivamente do material do CP e v é o volume dado por $V = \pi(D^2/4) L$. Substituindo as equações das taxas de balanço de energia, tem-se que:

$$I^2 R' e L - \varepsilon \sigma (A_s) (T_{Sma}^4 - T_{\infty}^4) = \rho c \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) L \frac{dT}{dt} \quad (4.13)$$

Definiu-se neste ponto, a faixa de temperatura de aquecimento de 26°C a 100°C e a resistividade da barra de NiTi de $0,8 \cdot 10^{-6} \Omega m$ e $1 \cdot 10^{-6} \Omega m$ para martensita e austenita respectivamente (MELLOR, 1987). A relação da resistência elétrica com a resistividade ρ do material é dada por:

$$R = \rho \frac{l}{A}, \quad (4.14)$$

sendo ρ a resistividade elétrica do material ($\Omega.m$), R a resistência elétrica (Ω), l o comprimento (m) e A é área da secção transversal (m^2).

Assim, tem-se que: $R_{ma} = 1,018 \cdot 10^{-6} \Omega$ e $R_a = 1,277 \cdot 10^{-6} \Omega$. A irradiação é dada por:

$$G = \sigma T_{viz}^4. \quad (4.15)$$

Logo, a irradiação é de 447 W/m², enquanto o poder emissivo da superfície a 100°C determinado pela equação 4.16 é 406W/m².

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4, \quad (4.16)$$

sendo T_s é a temperatura da superfície do CP.

A resistividade elétrica do CP depende da temperatura e da ordem de $0,8 \times 10^{-6} \Omega.m$ e $1,0 \times 10^{-6} \Omega.m$ para martensita e austenita respectivamente, gerando um curto-circuito quando alimentado diretamente por meio de uma fonte convencional. Para contornar esse problema, foi utilizado um transformador VARIAC e um outro transformador atuando como isolador elétrico entre o circuito elétrico e a carga. O VARIAC é um dispositivo elétrico que isola eletricamente dois circuitos e possui entrada constante e saída variável de corrente. Um potenciômetro permite ajustar os parâmetros de saída do VARIAC.

Alterando o nível de tensão fornecido na entrada, a tensão e a corrente da saída também irá variar. Quanto maior a relação de espiras menor é a tensão e maior é a corrente na saída. Assim, para transformadores valem as seguintes relações de transformação:

$$V_1/V_2 = a, \quad (4.17)$$

$$i_1/i_2 = 1/a, \quad (4.18)$$

onde a é a relação de espiras ou relação de transformação do transformador, V_1 é a tensão eficaz induzida na entrada, V_2 na saída e i_1 é a corrente eficaz induzida na entrada i_2 corrente eficaz induzida na saída.

4.3.3 Especificações dos Componentes do Sistema de Aquecimento

A Figura 4.5 apresenta o esquemático do sistema de aquecimento. Esse sistema é constituído de um VARIAC monofásico com entrada 220 V e saída de 0 ~240V, 6,3A e com potência aparente máxima de 1,5KVAr. A potência máxima dissipada no sistema de aquecimento é de aproximadamente 850 W.

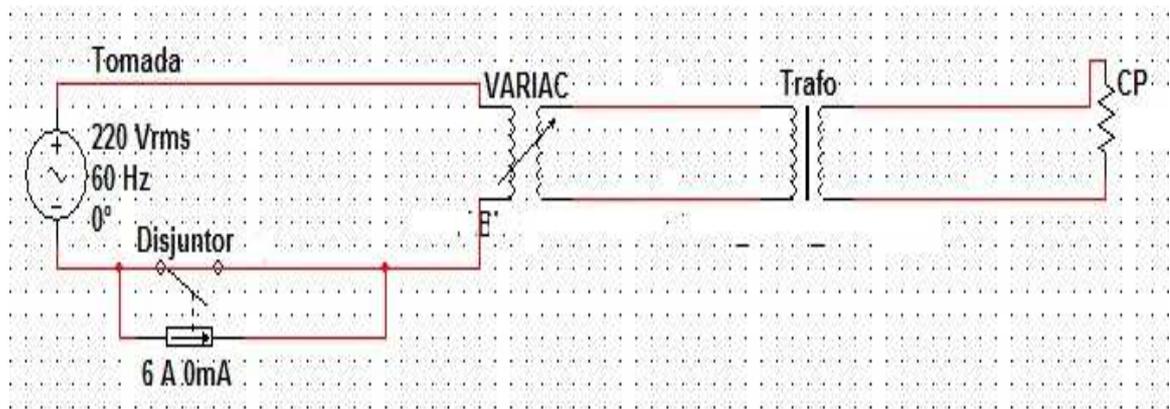


Figura 4.5 – Desenho esquemático do sistema de aquecimento.

Para realizar ajustes seguros em laboratório, o sistema foi montado de forma que a tensão de alimentação do CP não ultrapasse 0,95 volts. Entretanto, o aquecimento do CP NiTi demanda de corrente elevada para atingir a temperatura máxima desejada. Desse modo, a corrente máxima aplicada pelo VARIAC corresponde à temperatura máxima atingida na superfície do CP, e, para evitar superaquecimento do transformador durante o longo tempo de ensaio, foi especificado um sistema de ventilação forçada mantendo-o na temperatura ambiente. Foram instalados na saída do circuito do transformador um voltímetro e um amperímetro para monitoramento das grandezas elétricas, uma vez que a corrente que atravessa a secção do CP é aumentada em incrementos discretos por meio do potenciômetro do VARIAC.

4.3.4 Especificações do Sistema de Medição de Temperatura

O sistema de medição de temperatura é composto por termopares e por sensores infravermelhos. Foram utilizados sensores que permitem a medição das temperaturas com resolução de 0,1 °C e sensores de contato termopar uma vez que a emissividade não é constante ao longo dos comprimentos de onda. Existem diversos tipos de termopares, cada um com diferentes tipos de relações não lineares de tensão *versus* temperatura. Algumas dessas relações são padronizadas e outras não. Assim, definiram-se termopares tipo K (Cromel/Alumel) para as leituras de temperatura, devido à maior linearidade e sensibilidade por volta de 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (HUILONG, 2010).

Os sinais dos termopares não podem ser convertidos linearmente para a temperatura correspondente. Por isso, foi utilizado o programa *AqDAnalysis 7.02 Lynx* que oferece um recurso em que é possível realizar a conversão dos sinais de sensores não lineares para valores na unidade da grandeza medida (valor de engenharia). Por isso, os termopares foram fixados sobre a superfície do CP por meio de solda de ponto como mostra a Figura 4.6. Configurou-se o tipo de termopar e as respectivas relações de tensão em função da temperatura com as quais o programa de controle trabalha com o sinal produzido na medição.

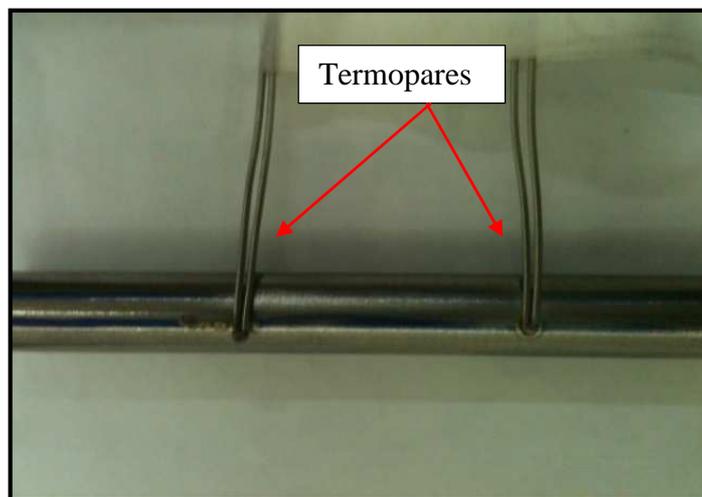


Figura 4.6 – Fixação dos termopares no CP.

Um dos problemas encontrados na construção desse sistema, reside na soldagem dos termopares devido ao formato circular dos CPs e também aos erros na leitura de temperatura principalmente quando submetidos a campos elétricos. Esse problema foi minimizado com a

calibração dos sensores por meio de regressão linear na faixa de temperatura de 20 a 100 °C após a soldagem sobre a superfície do CP e por meio da aplicação de corrente alternada, AC posicionando-se cada um dos sensores a uma distância de 40 mm entre cada ponto de medição. Os códigos das tabelas de linearização dos sinais produzidos foram escritos em formato ASCII e detalhamento do código fonte usado na linearização dos sinais está descrito no anexo 3.

Para leitura de temperatura, foram utilizados sensores infravermelhos modelo CT-SF-22 da Mico-Epsilon®. Foi utilizado ótica de foco padrão de 22:1 e lentes de foco fechado para cada sensor para possibilitar a medição de objetos pequenos. A tabela 4.2 apresenta as especificações técnicas dos sensores infravermelhos e a Figura 4.7 mostra as conexões elétricas desses sensores.

Tabela 4.2 – Especificações dos sensores infravermelhos. MicroEpsilon®.

Especificação	CT-SF22:C1
Faixa espectral	8 μm a 14 μm
Resolução da temperatura	0,1°C a 25°C
Precisão do sistema	$\pm 1^\circ\text{C}$ ou $\pm 1\%$
Tempo de resposta	150 ms
Emissividade/ganho	0,100...1,00
Transmissividade	0,100...1,00
Lente de foco fechado	0,6 mm@10 mm*
Comprimento e diâmetro do cabo	1 m; 2,8 mm

**permite a medição de pequenos objetos.*

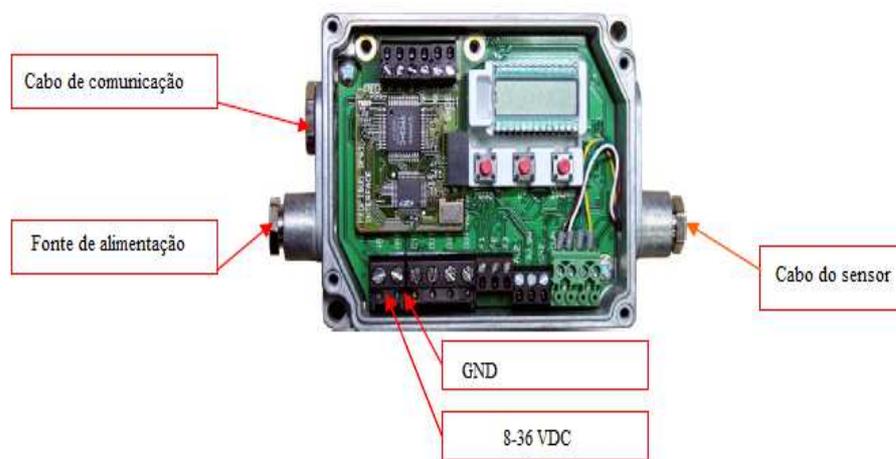


Figura 4.7 – Conexões do sensor infravermelho (MicroEpsilon®, 2010).

A Figura 4.8 mostra a desenho esquemático do sensor infravermelho. Esse sensor é equipado com rosca M12 x 1 e é conectado ao controlador de interface via cabo de fibra ótica.



Figura 4.8 – Desenho esquemático do sensor infravermelho (MicroEpsilon®, 2010).

O procedimento adotado para calibrar os termopares foi realizado no Laboratório de Metrologia Dinâmica da Universidade de Brasília. Os termopares foram calibrados em banho termostático por comparação direta com um sistema de medição padrão, constituído por uma termoresistência PT-100 ligada a um multímetro. A Figura 4.9 mostra a montagem do aparato utilizado para calibração dos termopares. À esquerda a referência formada pelo fundente, a leitura da referência exibida ao centro através do multímetro HP Agilent 34401A de $6^{1/2}$ dígitos e o banho termostático ao fundo.

O procedimento adotado está de acordo com o Procedimento Técnico PT-07-1: Calibração Estática de Transdutor de Temperatura entre -20 e 200°C do referido laboratório. Para cada ponto calibrado, são feitas quatro leituras espaçadas de um minuto. Esse procedimento tem como referência as normas ASTM-e220-86 “Standart Method for Calibracion of Thermocouples by Comparison Techniques” e NBR- 13772-2008 “Termo resistência – Calibração por Comparação com Termoristência de Referência”.

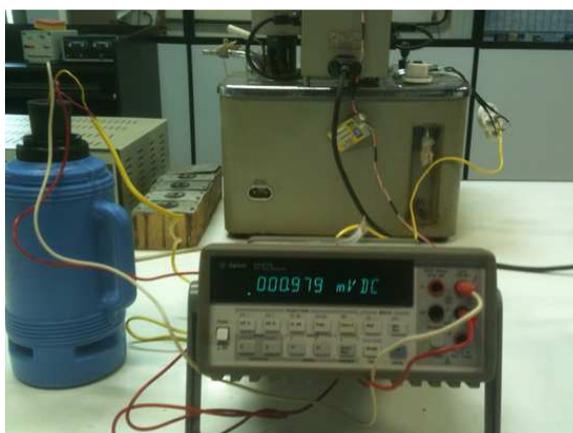


Figura 4.9 – Vista do aparato utilizado para calibração dos termopares.

A voltagem lida é convertida para temperatura com auxílio de uma tabela padrão conforme norma DIN 34 760. A curva de calibração é apresentada no anexo 4.

A calibração dos sensores infravermelhos foi realizada por meio de um código de calibração que é armazenado no controlador externo. Cada sensor tem um controlador associado a um código de calibração específico que consiste em três blocos de 4 caracteres e são impressos no cabo do sensor. O cabo dos sensores infravermelhos possui 1 metro de comprimento. O encurtamento desse cabo causará um erro de medição adicional de cerca de 0,1 K/m.

4.3.5 Aquisição de sinais

Foram utilizados dois *softwares* independentes de aquisição e análises de sinais, são eles: o *Aqdados 7.02* desenvolvido pela Lynx Tecnologia destinado à aquisição dos dados dos termopares e outro denominado *CompactConnect*® que é produzido pela Micro-Epsilon fabricante dos sensores infravermelhos e destina-se ao gerenciamento e aquisição de dados desses sensores. O *Aqdados 7.02* vem acompanhado do *AqDAnalysis* e é protegido por uma chave conectado na porta paralela ou USB. As principais características do *Aqdados 7.02* são:

- A aquisição de até 192 canais analógicos e de até 64 canais de contagem de pulso;
- Frequência de amostragem e duração do ensaio programável;
- Conversão para unidade de engenharia;
- Suporte a termopares (linearização e compensação de junta fria);
- Controle de zoom da apresentação dos sinais durante a aquisição;
- Apresentação de janela de espectros de frequência (FFT) dos sinais apresentados na janela de aquisição;
- Visualização gráfica: sobreposto, justaposto, XY e registro.

Ao conectar o sensor e iniciar o *CompactConnect*®, o controlador irá procurar automaticamente as configurações para execução. As principais características a serem consideradas sobre esse *software* são:

- Display, emissão gráfica e registro de tendência de temperatura;
- Controle das saídas e fácil calibração;
- Ajuste das funções de processamento de sinal;

- As funções disponíveis para gravação oferecem diversas opções de configuração, intervalo de aquisição, tempo de duração do ensaio, número de dados a serem coletados, ajuste de emissividade e transmissividade.

Medidas diretas de emissividade são feitas pelo método calorimétrico ou radiométrico. As medidas da emissividade hemisférica obtidas pelo método radiométrico possuem limitações devido aos sensores infravermelhos. Esses sensores não conseguem medir a radiação em um ângulo de 180°. Esse problema foi solucionado por meio do modo de seleção de processamento. Nesse modo, foi possível definir a emissividade para um valor externo obtido diretamente da superfície do CP.

4.3.6 Sistema de Determinação da Emissividade

Um sistema constituído por um transmissor ativo de infravermelho, em combinação com um detector, foi outro diferente modo de avaliação da emissividade utilizado. Para medição direta de emissividade a fonte de infravermelho e o detector foram dispostas em modo direto reflexivo (princípio espelho) como mostra a Figura 4.10.

As cabeças de medição foram posicionados na direcção normal da superfície do CP utilizado uma distância de 60 mm. A Figura 4.11 mostra o diagrama esquemático do sistema fonte de infravermelho. Se os valores de emissividade do material forem alterados, o novo valor da emissividade será determinado e transferido por meio da saída analógica para o sensor infravermelho conectado para medição da temperatura.

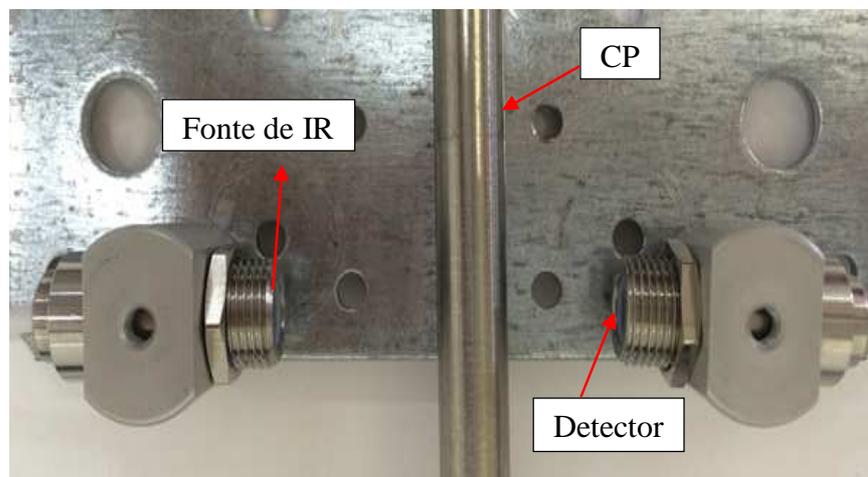


Figura 4.10 – Vista do sistema em modo direto reflexivo.

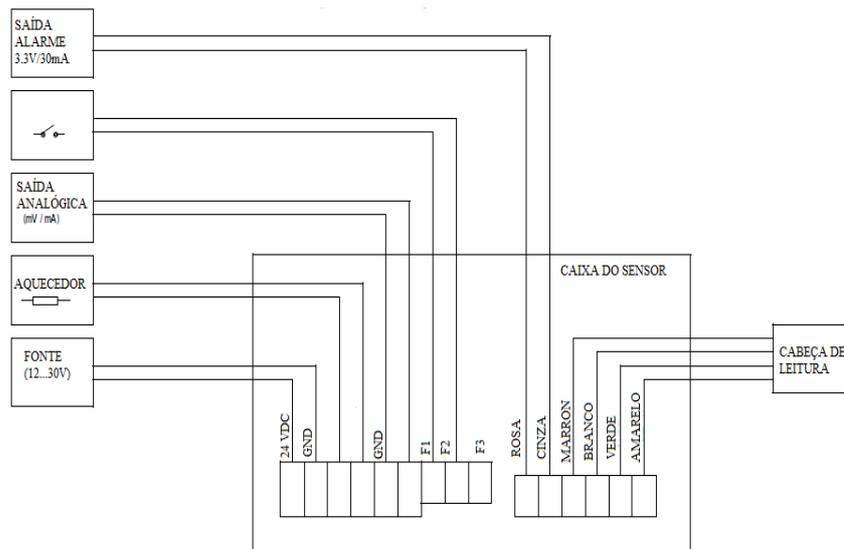


Figura 4.11 - Esquemático do sistema de medição de emissividade (MicroEpsilon®, 2010).

O sistema ativa o transmissor de IR e desliga com uma frequência de comutação de 0.5 a 20 Hz (dependendo das configurações). Ele armazena as leituras de IR recebidas do conversor analógico-digital, denominados de ADCI e ADCII. Depois o processador calcula a diferença entre radiação IR do tempo real ADCI/ADCII e recebidas durante alternância do aquecedor ADCIII e ADCIV. A taxa de emissão é calculada por meio da seguinte fórmula:

$$Eps_{out} = 1 - \frac{(ADCIII - ADCIV)}{(ADCI - ADCII)} * f_m - f_R, \quad (4.19)$$

onde f_m é o índice de reflexão e f_R o fator de correção hemisférica.

A relação linear da saída analógica $VEps_{out} = f(VEps_{out})$ fornece uma tensão proporcional de acordo com as opções de escala e pode ser definida via *software*. A configuração padrão é de 10 a 100% escalado para 0 V a 10 V. Assim, tem-se que: 0 V $\varepsilon = 0,100$ e 10 V $\varepsilon = 1,00$. As principais características desse sistema são:

- Saídas que permitem a transmissão de determinada emissividade para o sensor medidor de temperatura;
- Programação de canais de entrada e saída;
- Medição de temperatura com detecção e correção de emissividade do material;
- Determinação direta ou indireta da emissividade.

4.4 Procedimentos experimentais

Neste trabalho, os procedimentos utilizados baseiam-se nas normas anteriormente mencionada. Entretanto, algumas modificações procedimentais foram necessárias devido os três tipos de corpos de prova (CP's) denominados CP1, CP2 e CP3. Os testes do aparato foram realizados com CP3, fabricado de aço, para validação do aparato e os outros ensaios realizados com os CP1 e CP2, fabricados a partir de uma barra cilíndrica NiTi fornecida pela empresa Nimesis Techonology.

4.4.1 Geometria dos Materiais Ensaiaados

Os CP's foram fabricados de acordo com a norma JIS A 1423, exceto o formato superficial que foi cilíndrico, em razão das dificuldades de usinagem dos CP's, entre as quais se destaca a alta dureza do material (66,84 HRA) e a existência de referência na literatura onde a determinação da emissividade de SMA com formato cilíndrico foi obtida por meio do método radiométrico em condições similares (HUILONG, 2010). Além disso, durante os cortes dos CP's de NiTi, pode-se induzir tensões superficiais que, por consequência, poderão provocar transformações martensíticas no material (MIDDLETON, *et. al.*, 1985; ESCHER, *et. al.* 1990).

Foi utilizado uma cortadeira de precisão *Struers*, modelo *Secotom15* para realizar os cortes dos CP's. Os cortes foram feitos em baixa velocidade (0,005 mm/s) com resfriamento contínuo em um fluido refrigerante, e com tamanhos aproximados de 10 mm de diâmetro por 100 mm de comprimento.

A Figura 4.12 mostra o desenho esquemático e dimensões para fabricação dos CP's utilizados nos ensaios e a Tabela 4.3 apresenta propriedades fornecidas pelo fabricante da NiTi. Há exceção do CP2, que foi fabricado com 150 mm comprimento em virtude do espaçamento necessário para fixação e posicionamento dos sensores, além das conexões elétricas mais adequadas para o aquecimento.

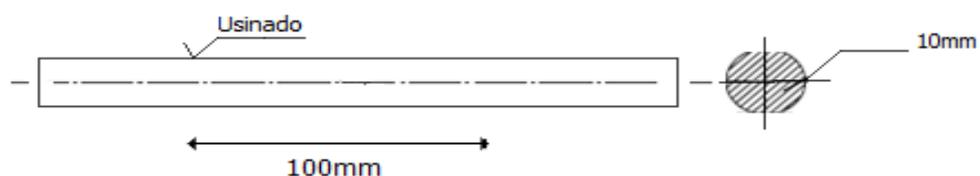


Figura 4.12 – Desenho esquemático dos CP-1 e 3.

Tabela 4.3 – Propriedades da liga de NiTi fornecida pelo fabricante.

Referência	Material	Diâmetro	A_f	Composição	Comprimento
LM00299	NiTi	10 mm	+85°C	Ni 55.9% - Ti	2000 mm

4.4.2 Preparação dos materiais ensaiados

Cada CP foi submetido à limpeza em banho ultrassônico durante 15 minutos em solução de $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$ (acetona) e, depois de decorrido o tempo de secagem, foram pesados, utilizando-se uma balança de precisão do fabricante Shimadzu, modelo AUY 220, que registra peso máx. 220 g e mínimo 10 mg.

A caracterização dos CP's foi realizada utilizando as técnicas de fluorescência de raios-x, calorimetria, excitação por impulso, ensaio de dureza e perfil geométrico de rugosidade. As transformações endotérmicas e exotérmicas foram observadas pela técnica termo analítica onde foram determinados os valores das temperaturas de transformação de fase A_s , A_f , M_s e M_f , bem como o calor latente de transformação. Para tanto, foi utilizado um Calorímetro Diferencial de Varredura, modelo DSC-8500 e *software Pyris* da Perkin Elmer como mostra a Figura 4.13.



Figura 4.13– Foto do forno do DSC 8500.

Este equipamento opera na faixa de temperatura de -70 °C a 750 °C e taxa de aquecimento e resfriamento controlada de 0,01 a 750 °C/min. Ele foi calibrado para uma taxa de aquecimento e resfriamento de 20 °C/min., utilizando-se padrões dos pontos de fusão do

índio e do alumínio. Nas medidas de DSC, foram utilizadas amostras com massas de 32 mg e cadinho de alumínio sob fluxo contínuo de nitrogênio gasoso N₂ de alta pureza 99,999% e vazão controlada de 20mL/min. O *software Pyris®* foi usado para analisar os dados. As temperaturas características observadas são apresentadas na Tabela 4.4 e a curva fluxo de calor em função da temperatura no anexo 1.

Tabela 4.4 – Temperaturas características medidas via DSC.

M_f (° C)	M_s (° C)	A_s (° C)	A_f (° C)
15,65	41,41	75,01	74,80

A composição química foi obtida por fluorescência de raios-x (FRX). Para isso, utilizaram-se o equipamento EDX-720 e o resultado obtido foi de Ti55%Ni, como mostrado no anexo 2.

Os módulos de elasticidade do material foram obtidos por técnica não destrutiva utilizando o equipamento Sonelastic®. Essa técnica baseia-se na análise da frequência do som característico emitido pelo material quando excitado por impulso. Além disso, foram realizados ensaios de dureza Rockwell A dos CP's, utilizando-se o Durômetro ZwickRoell ZH 250. As tabelas 4.5 e 4.6 apresentam os valores dos resultados médios obtidos para os ensaios de dureza e módulo elástico, respectivamente.

Tabela 4.5 – Resultado da Dureza Rockwell A dos CP's.

CP	Média HRA	Desvio
CR	58,00	± 0,36
1	66,86	± 0,36
2	66,20	± 0,36
3	50,20	± 0,40

Tabela 4.6 – Resultado da medição via Sonelastic®.

CP	E (GPa)	Desvio
CR	70,30	± 0,36
1	70,26	± 0,36
2	70,27	± 0,36
3	205	± 0,48

A norma JIS A 1423 estabelece que uma parte da superfície da amostra seja revestida uniformemente com emissividade igual ou maior que 0,95. Então, durante a preparação dos materiais ensaiados, foi definido um adesivo plástico para modificar uma parte da superfície do CP para apresentar características térmicas similares às de um corpo negro como mostra a Figura 4.14. Esse adesivo tem emissividade conhecida de 0,95 e pode ser facilmente inserido e removido na superfície polida dos CPs. Além disso, devido às propriedades térmicas do adesivo, em pouco tempo de aquecimento, a temperatura da superfície tende a se igualar à temperatura da superfície do CP que não foi alterado para corpo negro.



Figura 4.14 – CPs preparados com adesivo plástico.

Desse modo, a parte alterada para corpo negro é opaca à radiação e totalmente não reflexiva, absorvendo toda a radiação incidente. Para um determinado instante, a superfície do CP em regime transiente terá aproximadamente a mesma temperatura, porém emissividades diferentes.

4.5 Procedimentos para ajustes

Para verificar o desempenho do aparato experimental, foram realizados testes para determinar a emissividade de um material metálico convencional cujo resultado da emissividade é disponibilizado na literatura, o CP-3. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais Inteligentes (SG-9–UnB) cuja pressão atmosférica é de aproximadamente 895 hPa, pelo método radiométrico utilizando medições diretas indiretas de emissividade.

O CP é diretamente aquecido pelo sistema de aquecimento por meio de correntes alternadas de 0-30 A; tensões: 0-0,95 V. Os RMS (valores médios quadráticos) de grandezas elétricas percorrendo a superfície do CP foi medido por um amperímetro com uma precisão de (0,10%+0,04%d). As lentes de foco fechado foram posicionadas nos sensores infravermelhos a uma distância de 10mm do CP, sendo o sensor 1 medindo a parcela alterada para corpo negro e o sensor 2 a parcela não alterada para corpo negro.

Em seguida, foi ligado a bomba de vácuo. Para os ensaios, utilizou-se um vácuo de aproximadamente 30 KPa que foi regulado por meio da válvula vácuo de operação da câmara. Nesse momento, ligou-se o sistema de aquecimento e os demais equipamentos destinados ao monitoramento de tensão, corrente e pressão. As medições ocorreram a partir do equilíbrio térmico (regime permanente) e foram adotados os seguintes procedimentos de ajustes para atender aos requisitos:

- Ajuste da emissividade de 0,950 para o sensor que mede a porção corpo negro e um valor arbitrário para o outro sensor que mede a parte não alterada;
- Ajuste de transmissividade de 0,992 (lente de foco fechado) para os dois sensores;
- Inicia-se o *software* de aquisição sincronizando-o com os sensores infravermelhos;

O ajuste na tensão do sistema de aquecimento do CP deve ser em incrementos discretos. Cabe destacar que a medição de temperatura por meio dos termopares não foi realizada nos testes do aparato devido às dificuldades de fixação desses na superfície do CP.

Foram realizados 10 ensaios com o CPs na faixa de temperatura de 26 °C a 100 °C. Procurou-se refazer cada ensaio de medição, totalizando assim 20 ensaios com duração de 120 minutos cada ensaio. Considerando-se esse tempo, foram realizados 05 ensaios de medição de emissividade com o CP-3, 02 ensaios com o CP-2 e 03 ensaios com o CP-1. Além disso, cada ensaio foi repetido por diferentes modos, ou seja, medições pelo método radiométrico através de medições diretas e indiretas de emissividade.

Os ensaios foram realizados sempre nas mesmas condições de temperatura ambiente e os parâmetros de aquisição dos dados foram os mesmos para os *softwares* de aquisição, *compactconnect®* e *AqDados 7.02*. Ajustou-se os seguintes parâmetros:

- Intervalo de coleta de dados: 500ms;
- Número máximo de dados a serem coletados: $1000 \times 500 = 500.000$;
- Tempo de duração do ensaio: 7.200 s;

- Unidade: °C;
- Aquisição a cada 0,5 s durante 2 horas;

E foram adotados os seguintes procedimentos:

- Posicionamento do CP sobre o sistema de aquecimento. Depois de fechar e vedar a câmara de vácuo, liga-se a bomba a fim de obter o vácuo de trabalho;
- Isolou-se a câmara de vácuo com o tecido escuro (*Black out*);
- No método radiométrico, a emissividade do sensor 2 (apontado para fração não alterada para corpo negro) foi ajustada para que o valor de temperatura lido por este sensor coincidissem com o valor lido pelo sensor 1. O valor ajustado é a emissividade.

Para as análises, os dados coletados foram importados para o Matlab R2012A e o Excel 2013. Consideraram-se as medidas efetuadas após o sistema atingir o regime permanente, vácuo, temperatura de 10 °C acima da temperatura ambiente e aproximações de três casas decimais.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Emissividade do aço 1020

A emissividade hemisférica total do CP-3 em função da temperatura é mostrada na Figura 5.1. Trata-se da temperatura média e de valores médios da emissividade hemisférica total determinadas pelo método radiométrico, sendo dez medições em cada ponto.

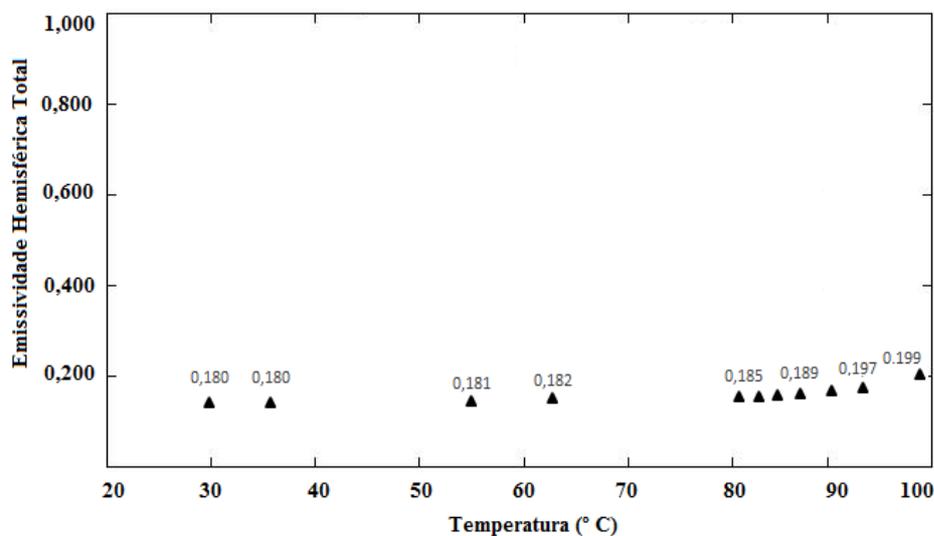


Figura 5.1 – Emissividade em função da temperatura do CP-3.

A emissividade total aumentou de 0,180 a 29 °C para aproximadamente 0,199 em 100 °C, que corresponde a um aumento médio de 9,3%. Verifica-se, por meio da análise dos resultados apresentados na Figura 5.1, que esse é um comportamento característico dos materiais metálicos, ou seja, na faixa de temperatura considerada a emissividade é praticamente constante e sua amplitude também é coerente com os dados disponíveis na literatura (MAYNARD, 2011).

Mantidas as mesmas condições de medição, observou-se o mesmo comportamento em todas as medições realizados com CP-3. A Figura 5.2 mostra a superposição das curvas dos resultados da emissividade em função temperatura obtidas pelo método radiométrico: (1) calculado, (2) por medição direta, (3) por medição indireta. Para a faixa de temperatura analisada, os dados de emissividade obtidos indicam que a emissividade hemisférica total do CP-3 aumenta simultaneamente com a temperatura, registrando aumento mais expressivo quando a temperatura aumenta por mais de 50 °C.

A Figura 5.3 mostra a emissividade hemisférica total de alguns metais polidos e oxidados em função da temperatura. Geralmente os metais possuem muitos elétrons livres

refletindo naturalmente a parte da energia térmica incidente, resultando em pequena absorção e baixa emissão de energia (MAYNARD, 2011). Comparando-se os dados de emissividade do CP-3 determinados no presente trabalho com os dados preexistentes na literatura, visto por meio da Figura 5.2, nota-se que os resultados obtidos são condizentes (MAKINO *et al*, 1983).

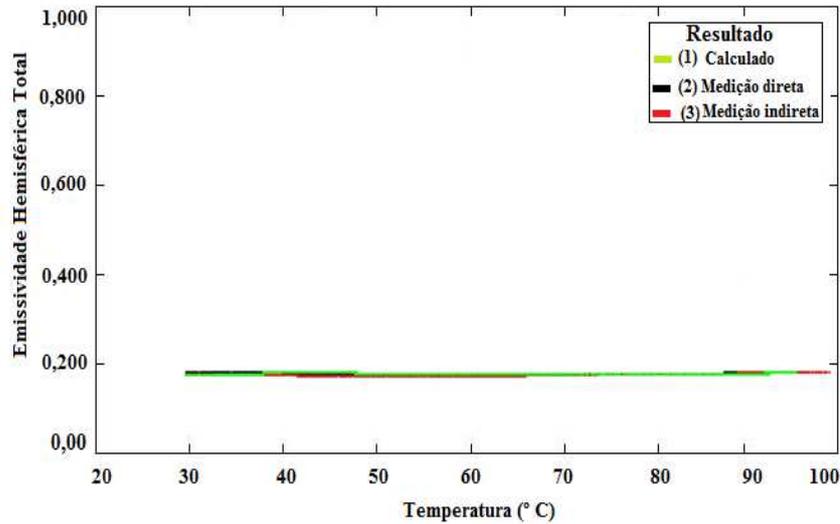


Figura 5.2 – Curvas da emissividade hemisférica total em função da temperatura do CP-3.

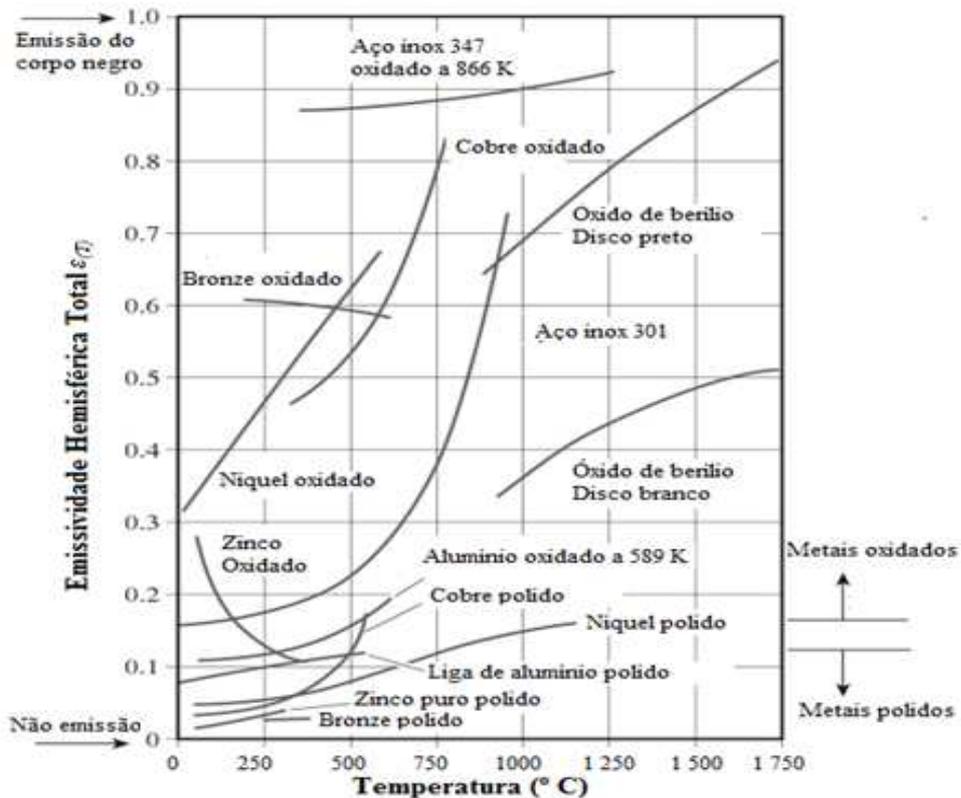


Figura 5.3 - Variação da emissividade hemisférica de alguns metais (Ozisik, 1973).

Valores de emissividade hemisférica mais elevados para o aço foram obtidos pelo grupo de pesquisa VTT. No entanto, nesse estudo a emissividade do aço foi determinada para uma faixa de temperaturas de cerca de 150° C até 550° C em pressão atmosférica e foram relatados erros esperados de 10% nos seus dados, enquanto que nesse trabalho o erro na medição de emissividade do CP-3 (aço) para o qual existe na literatura um ou mais valores aceitos como corretos, foi de $\pm 3,7\%$. Além disso, é provável que a superfície da amostra pode ter sido tratada de forma diferente quando comparado com a superfície mais polida do CP-3 utilizado nos ensaios. Após essas análises, conclui-se que:

- Foi possível aquecer o CP-3 de 26 a 100° C com uma taxa de aquecimento de 1° C/minuto;
- A câmara de vácuo possibilitou maior repetibilidade nas medições;
- As medições efetuadas com o CP-3 demonstraram que o aparato experimental pode determinar a emissividade hemisférica do aço;
- As medições pelo método radiométrico são fortemente dependentes da calibração dos sensores com padrões de referência, dos quais se deve ter conhecimento das propriedades superficiais;
- O aparato experimental é capaz de medir a emissividade com até três casas decimais;
- O CP-3 utilizado nos ensaios, apresenta baixa emissividade e conseqüentemente, a parcela associada a transferência de calor por radiação é pequena.
- As medições indiretas através do método radiométrico possibilita medições de emissividade em maior tempo (cerca de 2 horas);
- O aparato experimental construído foi capaz de determinar o valor da emissividade em temperaturas próximas da temperatura ambiente.

5.2 Emissividade da liga Ni₅₅Ti₄₅

A Figura 5.4 mostra a emissividade hemisférica total do CP-1 (Ni₅₅Ti₄₅), em função da temperatura. As mudanças de fase foram induzidas termicamente sem alterações de forma e os dados da curva referem-se a valores médios de temperatura e emissividade repetidos cinco vezes em cada ponto. Os dados foram determinados sobre a superfície do CP pelo método radiométrico através de medições indiretas. A curva da Figura 5.5 mostra a emissividade

hemisférica total em função da temperatura do CP-1 para escala reduzida de 0,100~0,350 durante o aquecimento.

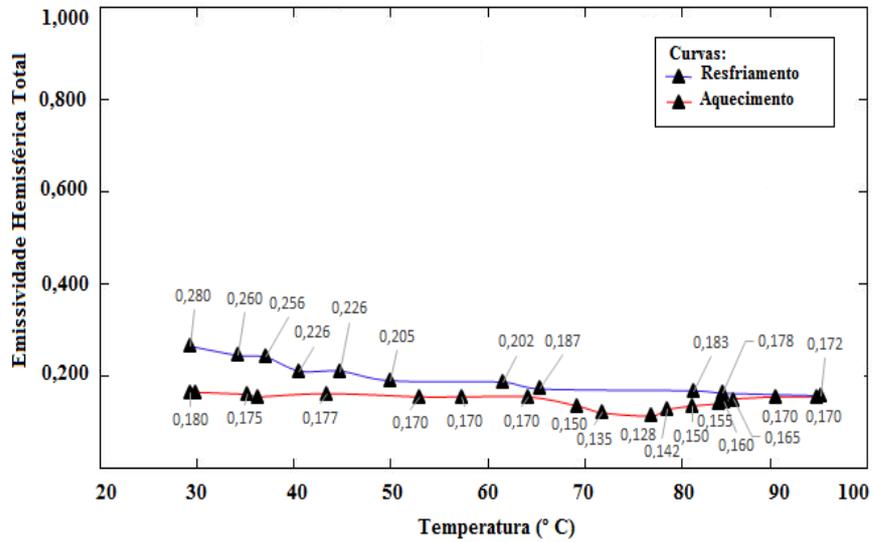


Figura 5.4 – Emissividade hemisférica total em função da temperatura do CP-1.

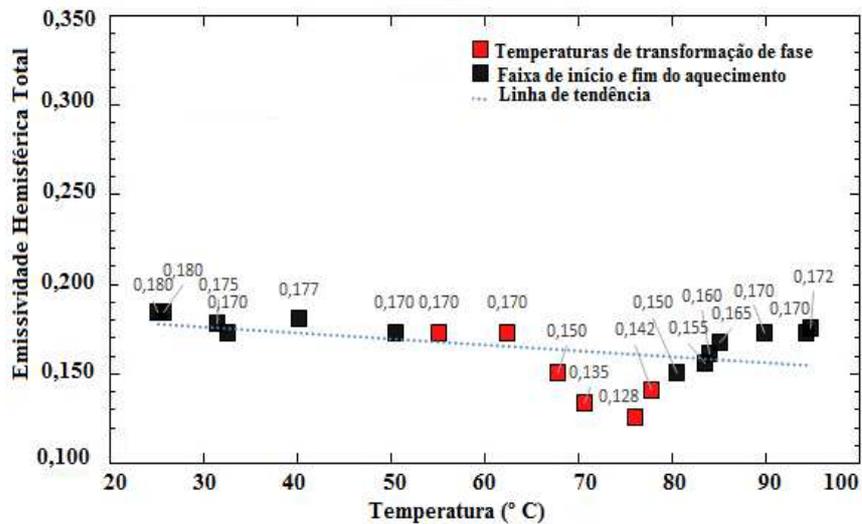


Figura 5.5 – Emissividade hemisférica total em função da temperatura do CP-1 durante o aquecimento.

Verifica-se que durante o aquecimento os valores de emissividade diminuem de 0,180-0,170 no intervalo de 26 a 65 °C. A variação média foi de 19,70%, ou seja, de 0,170 a 0,142 entre o início e fim da formação da fase austenita, no intervalo de temperatura de 56,8 °C a 78,20 °C.

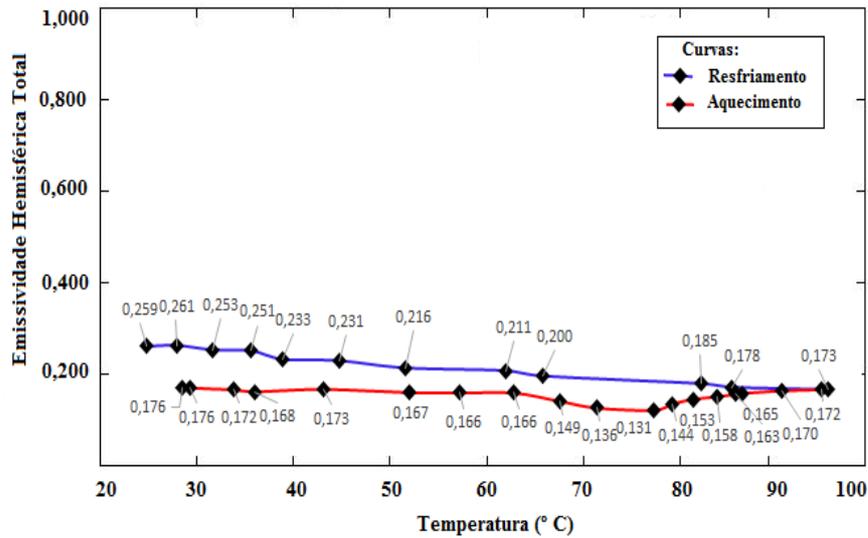


Figura 5.6 – Emissividade hemisférica total em função da temperatura do CP-2.

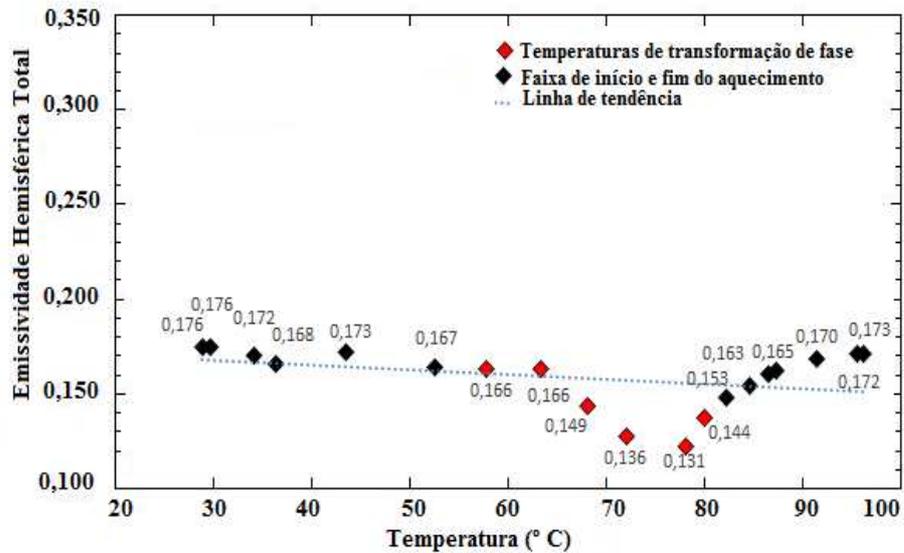


Figura 5.7 – Emissividade em função da temperatura do CP-2 durante o aquecimento.

A Figura 5.6 mostra a curva da emissividade hemisférica total do CP-2 em função da temperatura. A curva representa a média dos valores que foram determinados por medições diretas. A curva da Figura 5.7 mostra a emissividade hemisférica total *versus* temperatura do CP-2 para escala reduzida de 0,100~0,350 durante o aquecimento. Na faixa de temperatura analisada durante o aquecimento, os dados indicam uma diminuição da emissividade com o aumento da temperatura.

A emissividade variou 15,04% entre a temperatura início e fim da formação da austenita. Para relacionar a variação da emissividade com o erro produzido na medição de temperatura, caso a emissividade não fosse corrigida, utilizar-se-á a Equação 5.1.

$$T^4 = E(t)/\varepsilon\sigma. \quad (5.1)$$

Substituindo-se a temperatura e emissividade na equação, tem-se que:

$$\frac{T_1^4}{T_2^4} = \frac{\frac{E(t)}{\varepsilon_1\sigma}}{\frac{E(t)}{\varepsilon_2\sigma}}, \quad (5.2)$$

onde T_1 é a temperatura média medida antes do ajuste da emissividade, T_2 é a temperatura real da superfície, ε_1 é a emissividade medida antes do ajuste, e ε_2 a emissividade real da superfície. Resolvendo a Equação 5.2 para T_2 tem-se:

$$T_2 = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} T_1. \quad (5.3)$$

Para os dados experimentais de emissividade deste trabalho, tem-se que:

$$T_2 = 1,0377T_1. \quad (5.4)$$

Portanto, a temperatura T_1 (temperatura final de formação da austenita) lida como 78,2 °C é corrigida para 81,15 °C com o ajuste na emissividade ε_2 . Sendo assim, 15% de variação na emissividade corresponde a um erro aproximado de 3 °C graus na temperatura medida sem a correção da emissividade.

As Figuras 5.8 e 5.9 mostram curvas da emissividade em função da temperatura durante o resfriamento. As curvas referem-se aos ciclos de resfriamento visto nas Figura 5.4 e 5.6 respectivamente, para escala reduzida de 0,100~0,350. Por meio dessas curvas foi verificado que a emissividade é inversamente proporcional à temperatura, ou seja, os valores de emissividade aumentam e a partir de M_S , esses valores tendem a aumentar com maior amplitude. Os dados de emissividade hemisférica total indicam um comportamento diferente dos materiais metálicos convencionais. Verifica-se que a emissividade aumenta em média 24,74% desde A_S até M_S . Entretanto, durante o ciclo de resfriamento as medições foram realizadas de M_S até a temperatura de 24 °C e a M_f ocorre em torno de 15 °C.

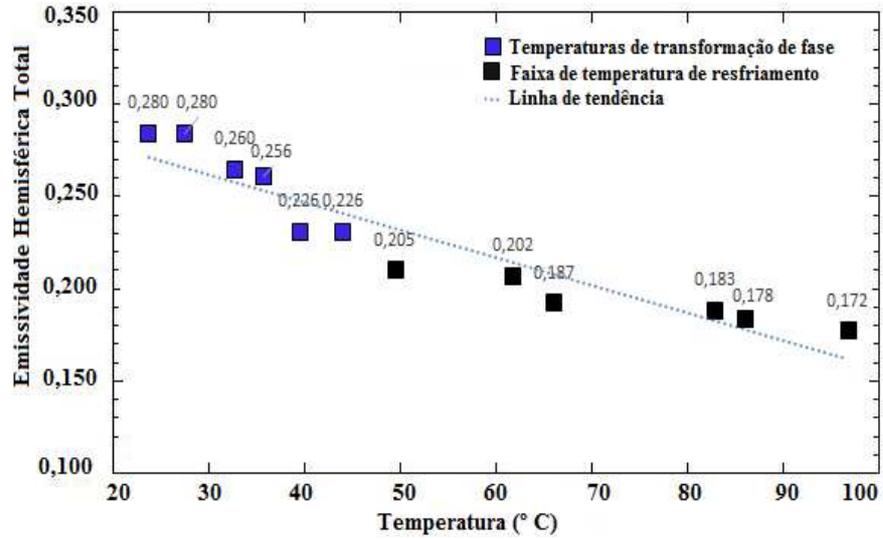


Figura 5.8 – Emissividade hemisférica total em função da temperatura do CP-1 durante o resfriamento.

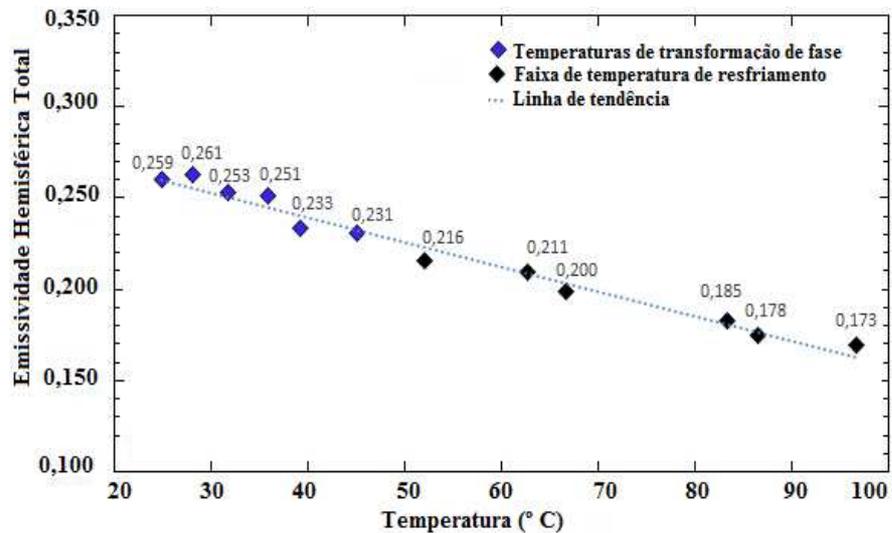


Figura 5.9 – Emissividade hemisférica total em função da temperatura do CP-2 durante o resfriamento.

Para essa faixa de resfriamento, a emissividade variou 23,4%. Por outro lado, os dados de emissividade mostrados nas Figuras 5.5 e Figuras 5.7 mostram que a maior variação da emissividade ocorre na faixa de temperatura em que é observado a transformação de fase, sendo a amplitude dos valores decrescente até A_f e volta a crescer.

5.3 Análise do efeito da rugosidade da SMA

A emissividade é uma função de três variáveis: temperatura, comprimento de onda e direção. Assim, a emissividade total é uma função da temperatura. A partir do resultado da análise térmica de DSC, verificou-se que o CP-NiTi à temperatura ambiente (cerca de 25 °C) encontra-se no estado parcialmente martensítico. Para investigar os efeitos da rugosidade da superfície e relacioná-los com o resultado obtido na medição de emissividade aqui estudada, utilizou-se um Rugosímetro SJ-201 Mitutoyo.

Foram realizados 20 ensaios para determinar a rugosidade da superfície nas direções XY. As medições da rugosidade foram feitas em temperatura ambiente estável, comprimento de amostragem (*Cut-off*) de 0,8 mm, deslocamento de 4 mm. A Figura 5.10 mostra o resultado da rugosidade do CP-1.

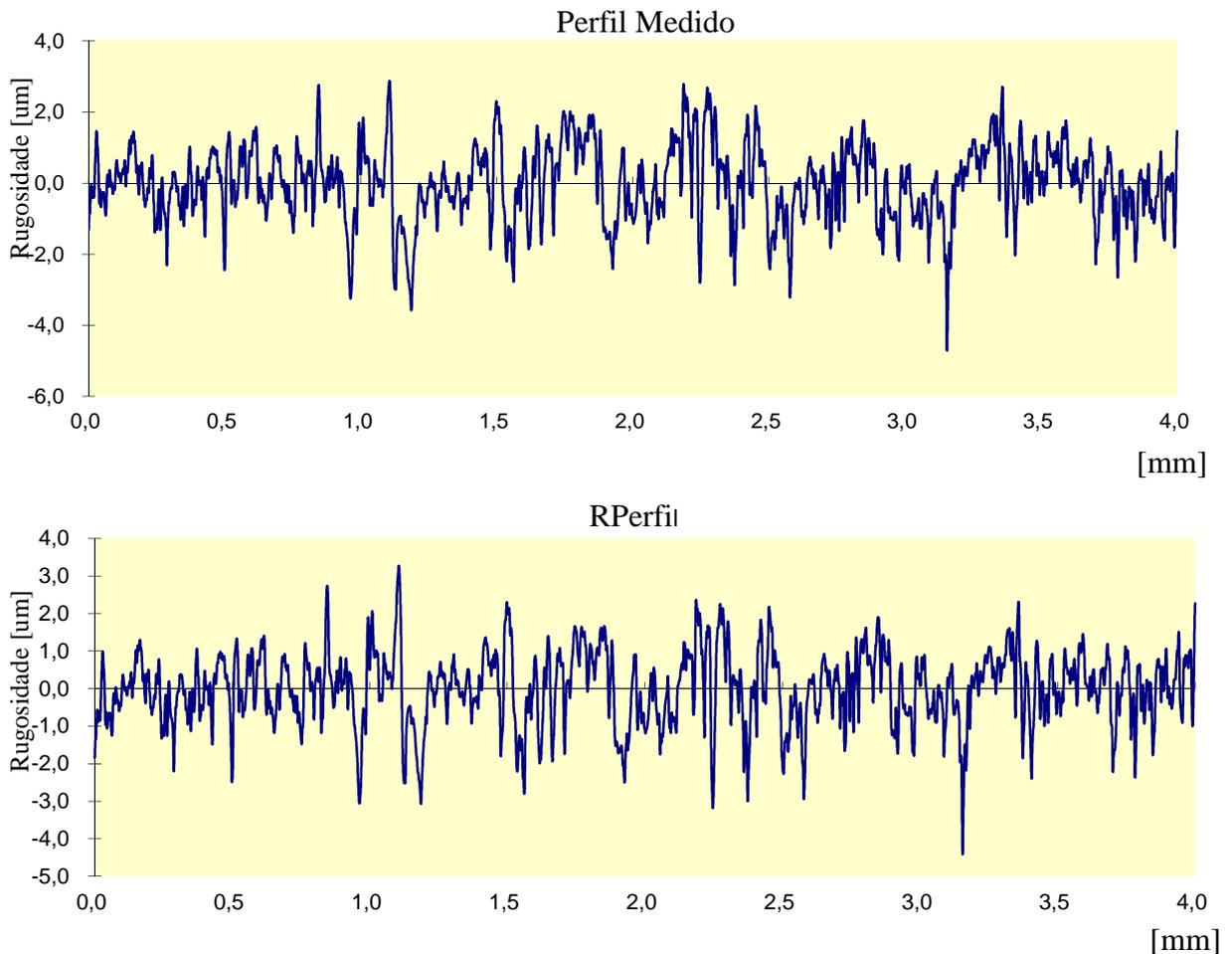


Figura 5.10 – Perfil medido e perfil R do CP-1 à temperatura ambiente.

O resultado médio obtido nas medições à temperatura ambiente (25 °C) e a 100 °C é apresentado na Tabela 5.1. O fator R foi determinado pela equação 2.1 e o número n foi obtido através do perfil medido. A Tabela 5.2 apresenta o resultado dos parâmetros calculados.

Tabela 5.1 – Resultados de parâmetros de rugosidade do CP-1.

CP-1	T = 25 °C	T = 100 °C
R_a	0,7610 μm	0,8217
R_z	5,4194 μm	3,419
R_q	0,9685 μm	0,8226

Comparando-se os resultados obtidos na medição (Tabela 5.1) com os da literatura (Tabela 2.2) e com o resultado calculado (Tabela 5.2), observou-se que a rugosidade do CP-1 é maior na fase martensita.

Tabela 5.2 – Parâmetros de rugosidade calculados para o CP-1.

CP-1	$R_a(\mu\text{m})$	σ	$n(1/\mu\text{m})$	R
	0,761	0,951	0,192	0,752

No estado parcialmente martensítico o CP NiTi é repleto de micro relevos de superfícies aumentando a quantidade de direções para emissão da radiação como mostrado na Figura 2.8.

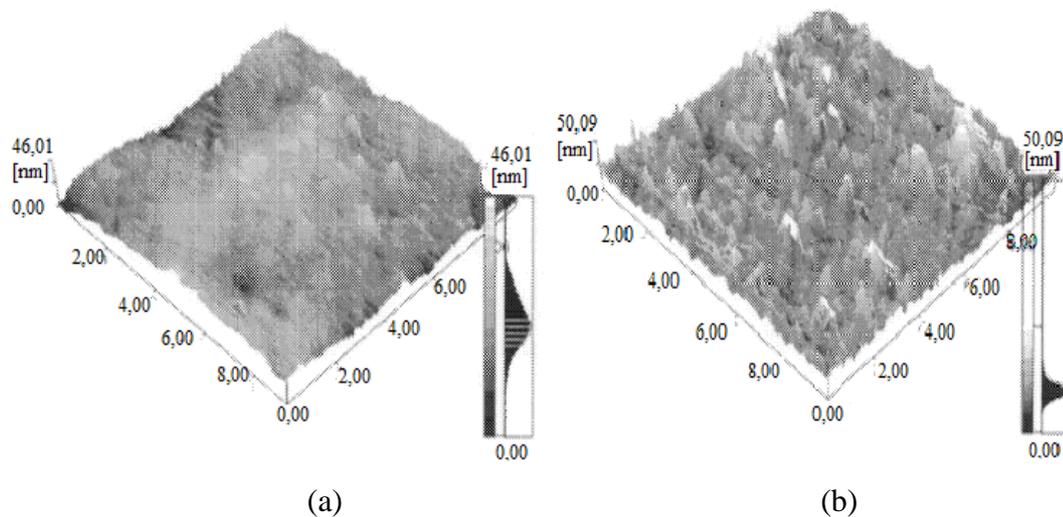


Figura 5.11 –Topologia superficial da NiTi. a) Austenita. b) Martensita (adaptado de Huang e Zhang, 2004).

Em outras palavras, cada micro relevo superficial causado pela variante da martensita tem uma direção normal própria (Figura 5.11b). Exatamente na temperatura A_s a emissividade começa a diminuir, devido aos relevos de superfície da martensita começarem a diminuir, reduzindo o número de direções de emissividade. Na temperatura A_f a emissividade hemisférica total é mínima, uma vez que os micros relevos da martensita desapareceram, minimizando significativamente as direções de emissividade (Figura 5.11a). Para temperaturas acima de A_f , a emissividade volta a aumentar devido ao efeito da temperatura. Além disso, as superfícies mais rugosas apresentam maiores áreas de sobre que as superfícies mais lisas e com maior área superficial, maior tende a ser o potencial de absorção, e conseqüentemente maior emissividade. Portanto, o relevo da superfície durante a transformação de fase é o fator dominante para a variação da emissividade da SMA.

5.3 Análise de Incerteza Experimental

A análise de incertezas tem como objetivo calcular os prováveis erros nos resultados obtidos experimentalmente. O método de análise de incerteza é adaptado da análise da incerteza de (WHEELER e GANJI, 1996). Em sua análise, uma variável medida “ R ” é a função de variáveis primárias $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. Então no experimento

$$R = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n). \quad (5.5)$$

Considerando as incertezas $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ das variáveis primárias, o método propõe que a incerteza final w_R seja dada pela equação 5.6.

$$w_R = \left[\sum_{i=1}^n \left(w_{xi} \frac{\partial R}{\partial x_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.6)$$

O *software* EES – Engineering Equation Solver foi utilizado para calcular a incerteza. Esse software calcula numericamente a incerteza da medição resultante quando fornecidos os valores das variáveis primárias e os valores das incertezas individuais estimadas através do método referido. Para análise de incertezas nos valores medidos de emissividade dos CPs pelo método radiométrico nas medições diretamente utiliza-se da equação (4.19). Foi considerado

somente os erros aleatórios devido a leitura de temperatura introduzido a partir dos termopares tipo *K* e das medições diretas e indiretamente usando os sensores infravermelhos.

A incerteza é dependente das incertezas das medidas primárias. A medição a partir dos termopares possui compensação interna e tem incerteza de ± 1 °C na faixa de 0 a 100 °C. A análise de incerteza para os resultados obtidos nas medidas diretas pelo método radiométrico mostrou valores de incerteza de $\pm 4,2\%$, enquanto nas medições indiretas a incerteza da emissividade foi maior, cerca de $\pm 7,36\%$.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Nesse trabalho, foi concebido, construído e testado um aparato experimental para medição de emissividade hemisférica total de ligas com memória de forma. Metodologicamente, a concepção foi orientada pelas normas ASTM E1933-99 (2010) e JIS A 1423. Na temperatura de 25 °C a 120 °C o aparato opera na faixa espectral de 8~14µm sob vácuo e permite a medição da emissividade direta e indiretamente pelo método radiométrico. As funcionalidades e precisão do aparato foram avaliadas através da caracterização da emissividade em função da temperatura de um aço 1020 e um liga Ni₄₅Ti₅₅ com memória de forma entre 25° C e 95° C. O comportamento observado da emissividade do aço é consistente com resultados disponíveis na literatura.

O comportamento da emissividade da liga Ni₄₅Ti₅₅ também é consistente com outros resultados disponíveis na literatura. Neste caso, no aquecimento a emissividade diminui de 0,171 na fase martensita para 0,155 na austenítica, e vice versa no resfriamento. Esse comportamento é compreendido pelo fato da rugosidade da martensita ser maior do que a da fase austenítica.

Assim, conclui-se ainda que o objetivo estabelecido foi alcançado, e com isso dispõe-se de um aparato experimental que possibilitará o aprofundamento da pesquisa na relação entre fases e as respectivas estruturas cristalinas das ligas com memória e sua emissividade.

Para aperfeiçoamento do aparato experimental sugerem-se os seguintes trabalhos:

- Desenvolver um sistema de controle de temperatura da câmara de vácuo para ampliar a faixa operacional do aparato experimental;
- Repetir as medições utilizando um corpo de prova NiTi austenítico;
- Incorporar aos procedimentos de medição uma análise de incerteza;
- Modelar numericamente o aparato experimental considerando as trocas térmicas por radiação e seus efeitos direcionais e espectrais;

REFERÊNCIAS

ASTM (1995). **“Standard Test Method for Total Hemispherical Emittance of Surfaces from 20 to 1400 °C”**, C835-05, (04.06). American Society for Testing and Materials.

ASTM (1997). **“Standard Test methods for measuring and compensating for emissivity using Infrared imaging radiometers”**, E1933-99, (Reapproved 2010). American Society for Testing and Materials.

ABNT (2013). **“Ensaio não destrutivo –Termografia - Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos”**, ABNT NBR 15572, (15.04). Associação Brasileira de Normas Técnicas.

BUEHLER, W. J.; WANG, F. E. **A summary of recent research on the Ni-Tinol alloys and their potential application in ocean engineering**. Ocean Eng. pp.109-120. 1968.

CALLISTER, WILLIAM D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. John Wiley & Sons, 4^o ed., 852 p, USA, 1997.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4.ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2011.

DA SILVA, E.P. **Aplicações de ligas com memória de forma em estruturas adaptativas**. Série Arquimedes, Vol.2, Anais de DINCON 2003, pp. 2358-2387. Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, São José dos Campos, SP, 2003.

DA SILVA, E. P. **Fenomenologia das Ligas com Memória de Forma: Aspectos Microestruturais**. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, Brasil, 2011.

DELAEY, L., KRISHNAN, R. V., WARLIMONT, H. **Thermoelasticity, Pseudoelasticity and Memory Effects Associated With Martensitic Transformations. Part 1: Structural and Microstructural Changes Associated With the Transformations**. Journal of Materials Science, 9 , pp. 1521-1535, 1974.

- DELAURENTIS, K. J., MAVROIDIS, C., PFEIFFE, C., **Development of a Shape Memory Alloy Actuated Robotic Hand**, 2000.
- Del Campo L, Pérez-Sáez R.B., González-Fernández L, Esquisabel X, Fernández I, González-Martín P, *et al.* **Emissivity measurements on aeronautical alloys**. J Alloys Compd ;489:482–7, 2010.
- DELPUEYO, D., GREDIAC, M., BALANDRAUD, X. **Applying infrared thermography to analyse martensitic microstructures in Cu-Al-Be shape-memory alloy subjected to a cyclic loading**. Materials Science and Engineering vol. 528 pp 8249-8258, 2011.
- A. P. Dorey and J. H. Moore, **Advances in Actuators - Sensors**, IOP Publishing, 1995.
- DOS SANTOS, R. G. **Transformações de Fases em Materiais Metálicos**. 1ª Edição, Campinas, SP: Unicamp Ed., 219 p, 2006.
- ESCHER, K.; HUHNER, M. **Metallografical Preparation of NiTi Shape Memory Alloys**. Practice Metallografical, vol. 27, pp. 231-235, 1990.
- FU, T., TAN P. ZHONG, M. **Experimental research on the influence of surface conditions on the total hemispherical emissivity of iron-based alloys**. Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 40, pp 157-167, 2012.
- FUNAKUBO, H. **Shape Memory Alloys**. New York: Gordon & Bleach, 1987.
- GANDHI, M. V. and Thonpson, B. S., **Smart Materials and Structures**, Chapman & Hall, London, 1994.
- HALLIDAY, David; WALKER, Jearl; RESNIK, Robert. **Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. Vol. 2. LTC. 2002.
- HERVE, P.; CEDELLE, J.; NEGREANU, I. **Infrared technique for simultaneous determination of temperature and emissivity**. Infrared Physics & Technology vol. 55 pp 1-10, 2012.
- HODGSON, D.E.; Wu, M.H.. BIERMANN, R.J. 1998, **Shape Memory Alloys**. Technology Article edn, Shape Memory Applications, Inc., USA.

HUANG, W. M.; ZHANG, W. H.; GAO, X. Y. **Micro Mirror Based on Surface Relief Phenomenon in Shape Memory Alloys**. SPIE Vol. 4918, pp 155-161, 2002.

HUANG, W.M.; ZHANG, W.H. **Surface Relief Phenomenon in a NiTi Shape Memory Alloy Rod**. SPIE Photonics: Design, Technology, and Packagin vol. 5277 pp 198–205, 2004.

HUILONG, M. A. **Thermal Modeling of Shape Memory Alloys Wire Actuators for Automotive Applications**. Dissertação de Mestrado, Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Ontario, Canadá,177p. 2010.

INCROPERA, F. P.; DeWitt, D. P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 6ª Edição, ed. John Wiley & Sons, 2007.

INFRA TEMP. **Termometria Infravermelha – Teoria Básica**. Infratemp, 1ª Revisão, 2010.

JIS (1983). “**Simplified Test Method for Emissivity by Infrared Radio Meter**”, JIS A 1423 (Reaffirmed 1988). Japanese Industrial Standard.

KRISHNAN, R. V.; DELAEY, L.; TAS, H. **Thermoelasticity, Pseudoelasticity and Memory Effects Associated With Martensitic Transformations. Part 2: The Macroscopic Mechanical Behaviour**. Journal of Materials Science, 9 (1975), pp. 1536-1544.

KREITH, F. **Princípios da Transmissão de Calor**. 3º edição Ed. Edgard Blücher, São Paulo, 1977.

LAGUDAS, D.C. **Shape Memory Alloys – Modeling and Engineering Applications**. Springer, Texas, USA, 446p. 2008.

LÜSSI, K.M. **A Study and Implementation Analysis of An Anti-Sagging Device for Power Transmission Lines Using Shape Memory Alloys**. Dissertação de Mestrado, Department of Mechanical Engineering, University of KwaZulu-Natal, South Africa,147p. 2009.

MAKINO, T.; KUNITOMO, T.; MORI, T. **Study on the Properties of Thermal Radiation of Metallic Materials for High Temperature**. Trans. ASME., 49, pp 1040-1047, 1983.

- MALDAGUE, XAVIER P. V.; MOORE, Patrick. **Infrared and Thermal Testing**. ASNT, v.3 2001.
- MARINETTI, S.; CESARATTO, P.G. **Emissivity estimation for accurate quantitative thermography**. NDT & E International vol. 51 pp 127–134, 2012.
- MATLABR2011b. **TheMathWorks**. Disponível em: </www.mathworks.com/helpS; 2011>.
- MAYNARD, R.K. **Total Hemispherical Emissivity of Very Hight Temperature Reactor (VHTR) Candidate Materials: Hastelloy X, Haynes 230, and Alloy 617**. Dissertation Doctor of Philosophy of the Graduate School, University of Missouri, U.S.A, 86p. 2011.
- MERIAUDEAU, F.; RENIER E.; TRUCHETET F. **Temperature Imaging and Image Processing in the Steel Industry**. Optical Engineering, vol. 35 (12) pp 3470-3481, 1996.
- MELLOR, B.G., in: **The Science and Technology of Shape Memory Alloys**, Ed. V. Torra Impresrapit, Barcelona, 1987, p.334.
- MICHALSKI, L., ECKERSDORF, K., K., **Temperature Measurement**, John Wiley & Sons Ltd, London, 1991, p 333.
- MICRO-EPSILON. **ThermoMETER CTrans Operation Manual**. Micro-epsilon messtechnik, Ortenburg, Alemanha, 2013.
- MODEST, M. F. **Radiative Heat Transfer**. McGraw-Hill International Edition, New York, 2013.
- MOUTINHO, A. M. C.; FRONTEIRA E SILVA, M. E. S.; DA CUNHA, M. A. C. M. **Tecnologia de Vácuo**. Ed. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa Portugal, 1980.
- OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M. **Mechanism of Shape Memory Effect and Superelasticity**. Cambridge University Press, Cambridge, 1998, p. 27-48.
- OTSUKA, K.; REN, X. **Recent developments in the research of shape memory alloys**. Intermetallics., vol. 7, p.511-528, 1999.

OTSUKA, K.; REN, X. **Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys**. Progress in Materials Science, v. 50, p. 511-678, 2005.

OZISIK, M. N. **Radiative Transfer and Interactions with Conduction and Convection**, John Wiley & Sons, New York, 1973.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia: microestrutura e propriedades**. São Paulo: Editora Hemus, 2007.

PALOPASKI, T.; LIEDQUIST, L. **Steel Emissivity at High Temperatures**. VTT RESEARCH NOTES 2299, ESPOO 2005. ISBN 951.38.6717.X., 2005.

PERIN, A. L. **Desenvolvimento de um equipamento para medição de emissividade**. UFRS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, Brasil, 2009.

J.L. Pons, **Emerging Actuator Technologies – A Micromechatronic Approach**, John Wiley & Sons, 2005.

RYHÄNEN J. **Evaluación de la biocompatibilidad de níquel-titanio con memoria de forma del metal de la aleación**. Ph.D. Tesis de la Universidad de Oulu, Finlândia, 1999.

SIEGEL, R.; HOWELL, J.R. **Thermal Radiation Heat Transfer**. Fourth ed., Taylor & Francis, Washington, 2002.

S.G. Agababov, **Effect of the roughness of the surface of a solid body on its radiation properties and methods for their experimental determination**, Teplofizika Vysokikh Temperature 6 (1968) 78–87.

SMST-2000: **Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies**, April 30 to May 4, 2000 Pacific Grove, CA, USA, 2000.

SMST-2003: **Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies**, November 6-9, 2003, Hong Kong, China.

SMST-2004: **Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies**, October 3-7, 2004, Baden-Baden, Germany.

SMST-2006: **Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies**, May 7, 2006, Pacific Grove, CA, USA.

SMST-2007: **Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies**, December 3-5, 2007, Tsukuba City, Japan.

SMST-2008: **Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies**, September 21-25, Stresa, Italy.

SMST-2010: **Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies**, May 16-20 2010, Pacific Grove, CA, USA.

SMST-2011: **Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies**, November 6-9, 2000, Hong Kong, China.

SMST-2013: **Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies**, November 6-9, 2000, Hong Kong, China, Springer.

SRINIVASAN, A. V. and Mc Farland, D. M., **Smart Structures, Analysis and Design**, Cambridge University Press, 2001.

SUTAPUN B.; TABIB-AZAR M.; HUFF A. **Applications of Shape Memory Alloys in Optics**. Applied Optics, Vol. 37, pp 6811-6815, 1998.

STOECKEL, D. **Shape Memory & Superelasticity: From Scientific Curiosity to Life Saving Technology**. NDC – Nitinol Devices & Components, Inc., Thayer School of Engineering at Dartmouth, EUA, 2011.

STRÓZ, D.; Goryczka, T., MORAWIEC, H. **Structure of the Rphase in NiTi shape memory alloys**. In: Morawiec, H., (Eds.). **Applied Crystallography**—Proceedings of the XVI, 2000.

TURNER, T.L. (2001), **Thermomechanical Response of Shape Memory Alloys Hybrid Composites**. NASA/TM-2001. Langley Research Center, Hampton, Virginia.

UMEZAKI, E. **Temperature Distributions of SMA Wires Embedded in Epoxy Resin Plates and Heated by Supplying Electric Current**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 17, pp.1115-1120, 2006.

WARLIMONT, H. **Thermoelasticity, Pseudoelasticity and the Memory Effects Associated With Martensitic Transformations – Part 3: Thermodynamics and Kinetics.** Journal of Materials Science, 9: pp. 1545-1555, 1974.

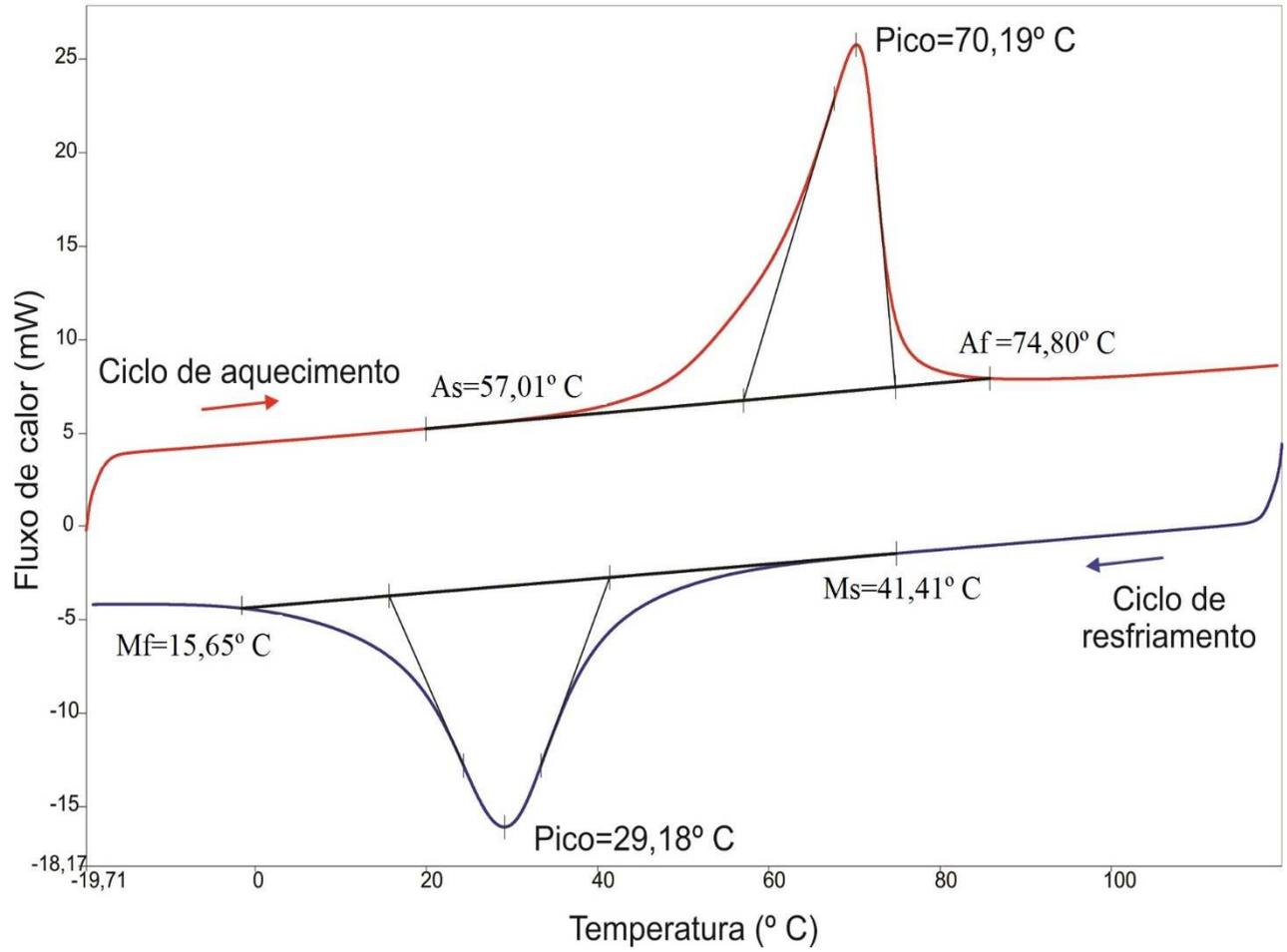
WEN C., MUDAWAR, I. **Modeling the effects of surface roughness on the emissivity of aluminum alloys.** International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 49 pp 4279–4289, 2006.

Wheeler, A.J., Ganji, A.R., **Introduction To Engineering Experimentation**, Prentice Hall, Inc., 1996, pp 159 – 161.

ŽAK, A.J.; CARTMELL, M.P; OSTACHOWICZ, W.M. **Dynamics and Control of a Rotor using an Integrated SMA/Composite Active Bearing Actuator.** Key Engineering Materials Vols. 245-246 pp. 233-240, 2003.

ANEXOS

ANEXO 1 – Curvas DSC da liga NiTi



ANEXO 2 – Resultado da Fluorescência de Raio X

Measurement Condition

Analyte	TG kV	uA	FI	Acq.(keV)	Anal.(keV)	Time(sec)	DT(%)
Ti-U	Rh 50	14-Auto	----	0 - 40	0.00-40.00	Live- 100	40
Na-Sc	Rh 15	86-Auto	----	0 - 20	0.00- 4.40	Live- 100	39

Quantitative Result

Analyte	Result	(Std.Dev.)	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)
====[No. 1 Layer]====< Layer1 >=====					
Layer1	5.000 um	(-----)	Fix	-----	-----
C3H6	100.000 %	(-----)	Fix	-----	-----
====[No. 2 Layer]====< Base >=====					
Ni	55.408 %	(0.049)	Quan-FP	NiKa	918.9251
Ti	43.888 %	(0.053)	Quan-FP	TiKa	463.3277
Al	0.295 %	(0.021)	Quan-FP	AlKa	0.0470
Fe	0.157 %	(0.004)	Quan-FP	FeKa	2.3914
Ca	0.143 %	(0.007)	Quan-FP	CaKa	0.9612
Si	0.109 %	(0.007)	Quan-FP	SiKa	0.0579

ANEXO 3: Código fonte da tabela de linearização

V2.0 TIPO K [-6.458, 54.875 mV] [-270, 1372 oC] ; Versao/Comentario

TMP K ; Identificacao da linearizacao

mv ; Unidade da grandeza de entrada

°C ; Unidade da grandeza de saida

5.487500E+0001 1.372000E+0003 ; Limite superior

5.363897E+0001 1.335824E+0003

5.219893E+0001 1.294289E+0003

5.077953E+0001 1.254094E+0003

4.933384E+0001 1.213898E+0003

4.776421E+0001 1.171023E+0003

4.606809E+0001 1.125469E+0003

4.424381E+0001 1.077234E+0003

4.025576E+0001 9.740664E+0002

3.814055E+0001 9.204727E+0002

3.599559E+0001 8.668789E+0002

3.382056E+0001 8.132852E+0002

3.156048E+0001 7.583516E+0002

2.910309E+0001 6.993984E+0002

2.622078E+0001 6.310664E+0002

1.966000E+0001 4.769844E+0002

1.608211E+0001 3.925742E+0002

1.321551E+0001 3.242422E+0002

1.105101E+0001 2.719883E+0002

9.358922E+0000 2.304531E+0002

6.247563E+0000	1.527422E+0002
4.833125E+0000	1.179063E+0002
2.503298E+0000	6.163281E+0001
1.073002E+0000	2.679688E+0001
0.000000E+0000	0.000000E+0000
-8.492688E-0001	-2.188477E+0001
-1.568126E+0000	-4.113281E+0001
-2.191328E+0000	-5.853516E+0001
-2.741653E+0000	-7.461914E+0001
-3.231151E+0000	-8.964844E+0001
-3.662908E+0000	-1.036230E+0002
-4.047989E+0000	-1.168066E+0002
-4.388995E+0000	-1.291992E+0002
-4.688774E+0000	-1.408008E+0002
-4.956507E+0000	-1.518750E+0002
-5.188309E+0000	-1.621582E+0002
-5.392683E+0000	-1.719141E+0002
-5.571579E+0000	-1.811426E+0002
-5.726954E+0000	-1.898438E+0002
-5.860739E+0000	-1.980176E+0002
-5.974832E+0000	-2.056641E+0002
-6.270902E+0000	-2.309766E+0002
-6.379443E+0000	-2.454785E+0002
-6.417752E+0000	-2.531250E+0002
-6.458000E+0000	-2.700000E+0002 ; Limite inferior

#FIMTAB ; Maior erro: 0.0997 oC = 0.006 %.

ANEXO 4: Curvas de Calibração do Termopar

