

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

CONCEPÇÃO, PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTE DE UMA BANCADA PARA MEDIÇÃO DE EMISSIVIDADE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Por,
Thiago Barra de Souza

Brasília, 12 de Dezembro de 2013



**ENGENHARIA
MECATRÔNICA**
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

CONCEPÇÃO, PROJETO, CONSTRUÇÃO E TESTE DE UMA BANCADA PARA MEDIÇÃO DE EMISSIVIDADE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

POR,

Thiago Barra de Souza

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Edson Paulo da Silva, UnB/ENM
(Orientador)

Prof. Dr. José Maurício T. Motta, UnB/ENM

Prof. MSr. Jones Yudi Mori da Silva, UnB/ENM

Brasília, 12 de Dezembro de 2013

FICHA CATALOGRÁFICA

DE SOUZA, THIAGO BARRA

Concepção, Projeto, Construção e Teste de uma bancada para medição de Emissividade em função da Temperatura,

Distrito Federal, Brasília, 2013.

xii, 77p., 297 mm. FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2013. Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1. Termometria infravermelha
3. Materiais metálicos

2. SMAs
4. Emissividade

I. Mecatrônica/FT/UnB

II. Bacharel

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DE SOUZA, T. B., 2013. Concepção, Projeto, Construção e Teste de uma bancada para medição de emissividade em função da temperatura. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº 016/2013, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 77p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Thiago Barra de Souza.

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Concepção, projeto, construção e teste de uma bancada para medição de emissividade em função da temperatura.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2013

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

Thiago Barra de Souza
SQS 315 Bloco F ap. 202 – Asa Sul.
70384 - 060 Brasília – DF – Brasil.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais Ana Paula e Jorge e ao meu irmão Matheus, que nunca desistiram de mim. Aos meus amigos da mecatrônica e demais familiares que sempre me incentivaram e aos meus amigos e amigas que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando e compartilhando momentos comigo.

Thiago Barra de Souza

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me dar vida e condições para chegar até aqui.

Agradeço aos meus pais Ana Paula e Jorge por não medirem esforços para me ensinar e apoiar e por fazerem de mim quem eu sou hoje.

Agradeço meu irmão Matheus, meus avós Edson e Idê (in memoria), Jorge (in memoria) e Maria, minha tia Raissa e todos os familiares que, de algum modo, contribuíram para a minha caminhada e que vão partilhar comigo deste momento de alegria.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Edson Paulo da Silva, por aceitar esta tarefa de me orientar neste trabalho, pela paciência, pelas soluções e caminhos sugeridos, pela incansável disposição em ajudar e aconselhar.

Agradeço aos meus amigos e amigas que acompanharam de perto este processo de graduação e sempre me apoiaram, aconselharam e incentivaram.

Agradeço a todos os professores e funcionários que fizeram parte do meu curso de graduação nesta universidade, pelos diversos conhecimentos adquiridos, não apenas na esfera cognitiva, mas na pessoal e social também. Em especial à professora Dra. Carla Koike, que me acompanhou durante meu mandato como presidente do grupo representativo do corpo discente de Engenharia Mecatrônica da UnB.

Agradeço ao aluno de pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos, Tadeu Castro, que trabalhou comigo durante todo o projeto dividindo conhecimentos, dificuldades encontradas na realização do projeto e fins-de-semana passados trabalhando.

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Thiago Barra de Souza

RESUMO

A medição à distância da temperatura de objetos por meio de termometria infravermelha é de grande interesse prático. Muitas aplicações só são possíveis caso se possa medir remotamente a temperatura de um dado objeto. O método mais comum para efetuar essa medida é por meio da aferição da quantidade de radiação térmica emitida pelo objeto. Contudo, dispositivos capazes de fazer essa medida dependem do valor de uma propriedade intrínseca do objeto e de sua superfície: a emissividade. A dificuldade reside no fato de que essa propriedade é de difícil averiguação e é influenciada por muitos fatores. SMAs (Shape Memory Alloys) são ligas metálicas com a propriedade de, uma vez deformadas de sua forma original, retornar a esta por meio do aquecimento da liga. Essa propriedade decorre de uma transformação martensítica termoelástica que ocorre na liga. Devido a esta transformação de fase as propriedades dessas ligas são dependentes da transformação em si e, conseqüentemente, da temperatura em que essa transformação ocorre. Estes fatores influenciam na emissividade das SMAs, tornando difícil a correta caracterização da emissividade da liga e, conseqüentemente, da medição da temperatura da liga por meios de termometria infravermelha. O presente trabalho visa conceber, projetar e construir e testar um aparato e definir um procedimento capazes de permitir a medição da emissividade de um objeto e de levantar a função de dependência entre a emissividade e a temperatura deste objeto.

Palavras-chave: Radiação térmica, termometria infravermelha, emissividade, materiais metálico, SMAs.

ABSTRACT

The measuring of the temperature of objects at distance by infrared thermometry is of great practical interest. Many applications are only possible if there's a way to remotely measure the temperature of a given object. The most common method for making this kind of measurement is by measuring the amount of thermal radiation emitted by the object. However, devices capable of making such measures depend on the value of an intrinsic property of the object and its surface: the emissivity. The difficulty lies in the fact that this property is difficult to investigate and is influenced by many factors. SMA (Shape Memory Alloys) are metal alloys with the property that, once deformed from their original form, they can return to it by means of heating. This property stems from a thermoelastic martensitic transformation that occurs in the alloy. Due to this phase transformation properties of these alloys are dependent on the transformation itself, and consequently the temperature at which this transformation occurs. These factors influence the emissivity of SMAs, making it difficult to properly characterize the emissivity of the alloy and consequently of the temperature of the alloy by means of infrared thermometry. This study aims to design, project and build and test a device and define a procedure both able to measure the emissivity of an object and raise the function of dependency between the emissivity and temperature of this object.

Keywords: Thermal radiation, infrared thermometry, emissivity, metallic materials, SMAs.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 O QUE SÃO LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA	4
2.2 COMPORTAMENTO E PROPRIEDADES DAS SMAS	5
2.3 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE RADIAÇÃO TÉRMICA	11
2.4 LEIS DE PLANK, WIEN E STEFAN-BOLTZMANN	15
2.5 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA	21
2.5.1 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE TEMPERATURA	21
2.5.2 MÉTODOS INVASIVOS DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA	22
2.5.3 MÉTODOS SEMI-INVASIVOS DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA	23
2.5.4 MÉTODOS NÃO – INVASIVOS DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA	23
2.5.5 FUNCIONAMENTO E TIPOS DE RADIÔMETROS INFRAVERMELHOS	24
2.6 AQUECIMENTO POR EFEITO JOULE E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA	25
3 CONCEPÇÃO E PROJETO DA BANCADA	28
3.1 METODOLOGIA	28
3.2 CONCEPÇÃO DA BANCADA DE TESTES DE EMISSIVIDADE	31
3.3 PROJETO DA BANCADA DE TESTES DE EMISSIVIDADE	36
3.4 MATERIAIS UTILIZADOS	44
4 CONSTRUÇÃO DA BANCADA	46
4.1 CONSTRUÇÃO DO APARATO	46
4.2 DEFINIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	54
5 TESTE DA BANCADA	57
5.1 TESTES PRELIMINARES DA BANCADA	57
5.2 TESTE DA BANCADA COM CP DE AÇO	60
5.3 RESULTADOS DA SMA	66
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	73
6.1 CONCLUSÕES	73
6.2 TRABALHOS FUTUROS	74
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
ANEXOS	76

LISTA DE FIGURAS

2.1	Curva fração volumétrica de martensita no material versus temperatura. Destaque para as temperaturas de transformação e a histerese do processo	5
2.2	Efeito Memória de Forma. Em 2.12 (a) temos um material em fase martensítica e baixa temperatura antes e após ser deformado (aplicação de carga). Em 2.12 (b) aquece-se o material acima de A_f , transformando a austenita em martensita, o que faz com que o material retorne a forma original. Finalmente em 2.12 (c) resfria-se novamente o material, de modo que este retorna à fase martensítica, mas mantendo a forma original	6
2.3	Curva tensão versus deformação para uma amostra de SMA na fase martensítica (temperatura abaixo de M_f)	7
2.4	Curva tensão versus deformação para uma amostra de SMA na fase austenítica (temperatura acima de A_f).....	8
2.5	Compilação gráfica do Efeito Memória de Forma e Pseudoelasticidade numa SMA ..	9
2.6	Gráfico tensão versus deformação versus temperatura. O comportamento total de uma SMA é descrito analisando-se esse gráfico. O EMF e a PE estão destacados.....	9
2.7	EMF num gráfico tensão versus deformação versus temperatura	9
2.8	Curvas tensão versus deformação em diferentes temperaturas. Em (a) a temperatura é bem maior que A_f , em (b) a temperatura é menor que M_f e em (c) a temperatura é maior que A_f	10
2.9	Curva tensão versus deformação em temperatura austenítica. A tensão de escoamento da liga é atingida e então ocorre deformação plástica	11
2.10	Processo de emissão de radiação. (a) como fenômeno volumétrico. (b) como fenômeno de superfície.	12
2.11	Espectro eletromagnético	13
2.12	Área pela qual se define a intensidade espectral	13
2.13	Radiosidade	14
2.14	Distribuição espectral de radiação para um corpo negro	16
2.15	Comparação de emissão de corpo negro e superfícies reais. (a) Distribuição espectral. (b) Distribuição direcional	17
2.16	Distribuições direcionais representativas da emissividade total direcional.....	19
2.17	Absorção, reflexão e transmissão de radiação incidente em um corpo	21
2.18	Efeito Seebeck em um termopar tipo T.....	23
2.19	Cilindro metálico aquecido por corrente elétrica	26
3.1	Balço da energia do objeto e do ambiente	33
3.2	Esquema do sistema de vácuo.....	34
3.3	Esquema do suporte dos sensores, corpo de prova e posicionamento destes dentro da câmara de vácuo.....	35
3.4	Esquema elétrico do sistema de aquecimento.....	36
3.5	CPs preparados com fita isolante agindo como material de emissividade de referência	40
4.1	Câmara de vácuo.....	46
4.2	Vista superior da câmara de vácuo	47
4.3	Bomba de vácuo Edwards RV8	47
4.4	Termômetros IR	48
4.5	Suporte dos sensores infravermelhos	49
4.6	Base de acrílico	49
4.7	Sistema de aquecimento	50
4.8	Disjuntor	50
4.9	Fonte de alimentação minipa.....	51

4.10	Vacuômetro	51
4.11	Notebook HP dv6 e <i>software</i> Compact Connect.....	52
4.12	Tecido escuro tipo courino	53
4.13	Vista lateral da bancada concluída	53
4.14	Vista superior da bancada concluída.....	54
5.1	Arquivo de saída com os dados coletados pelo Compact Connect	60
5.2	Curva emissividade x temperatura para o aço na condição de teste sem vácuo, ensaio 1	61
5.3	Curva emissividade x temperatura para o aço na condição de teste sem vácuo, ensaio 2	61
5.4	Esquema da radiação térmica ao redor do CP.....	62
5.5	curva emissividade x temperatura para o aço, ensaio 1	63
5.6	curva emissividade x temperatura para o aço, ensaio 2	64
5.7	curva emissividade x temperatura para o aço, ensaio 3	64
5.8	Software Compact Connect, curva temperatura x tempo para os ensaios com aço	65
5.9	Ensaio com CP de aço	66
5.10	Curva emissividade x temperatura para o NiTi, ensaio 1	67
5.11	Curva emissividade x temperatura para o NiTi, ensaio 2	67
5.12	Software Compact Connect, curva temperatura x tempo para os ensaios com NiTi	68
5.13	Ensaio com o CP de NiTi.....	69
5.14	Curva em escala reduzida do gráfico da Figura 5.10.....	69
5.15	Curva em escala reduzida do gráfico da Figura 5.11.....	70
5.16	Curva em escala reduzida do gráfico da Figura 5.13.....	71
6.1	Medidor de emissividade da micro-epsilon	74

LISTA DE TABELAS

3.1	Plano do projeto da bancada	37-39
-----	-----------------------------------	-------

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A_s	Austenita inicial	[°C]
A_f	Austenita final	[°C]
M_s	Martensita inicial	[°C]
M_f	Martensita final	[°C]
T_o	Temperatura de equilíbrio termodinâmico	[°C]
$I_{\lambda,e}$	Intensidade espectral de radiação	[W/m ² .sr.μm]
E	Poder emissivo total	[W/m ²]
E_b	Poder emissivo total de um corpo negro	[W/m ²]
P	Pressão	[kPa]
V	Volume	[m ³]
T	Temperatura	[K]
F_{em}	Força eletro-motriz	[V]
S_a	Coefficiente de Seebeck do metal A	[V/K]
S_b	Coefficiente de Seebeck do metal B	[V/K]
Pot	Potência elétrica	[VA]
I	Corrente elétrica	[A]
V_t	Tensão	[V]
L	Comprimento do cilindro	[mm]
D	Diâmetro do cilindro	[mm]
Re'	Resistividade elétrica do cilindro	[Ω/m]
c	Condutividade térmica	[cal/g°C]
G	Radiosidade	[W/m ²]

Símbolos Gregos

Δ	Varição entre duas grandezas similares	
λ	Comprimento de onda	[μm]
ρ	Densidade	[kg/m ³]
ϵ	Emissividade	

Subscritos

<i>sur</i>	ambiente
<i>out</i>	saída

Sobrescritos

•	Varição temporal
-	Valor médio

Siglas, Acrônimos e Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EMF	Efeito Memória de Forma
LMF	Ligas com Memória de Forma

PE	Pseudoelasticidade
SMA	<i>Shape Memory Alloy</i>
CP	Corpo de Prova
Nitinol	Níquel Titânio <i>Naval Ordnance Laboratory</i>
UV	Ultra-violeta
IR	Infra-vermelho
RTD	<i>Resistance Temperature Detectors</i>
IMS	<i>International Measurement System</i>
JIS	<i>Japanese Industrial Standard</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>
RMS	<i>Root mean square</i>

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta considerações gerais sobre o tema deste trabalho. Situa o leitor no âmbito de SMAs, bem como especifica a que se propõe este trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Materiais com memória de forma são um tipo especial de liga cuja aplicabilidade vem crescendo nos últimos anos [11]. Estes materiais foram descobertos na forma de ligas metálicas, sendo assim referenciados como Ligas com Memória de Forma (LMF) ou, como são mais comumente conhecidos, pelo termo em inglês SMA (*Shape Memory Alloy*). Apesar da sua descoberta datar da década de 1930, avanços significativos no seu estudo e aplicabilidade só tiveram início na década de 1960. Desde então, o uso de SMAs vem crescendo. As características de uma SMA que a distinguem de outras ligas metálicas são o efeito memória de forma (EMF) e a pseudoelasticidade (PE). O EMF é uma propriedade que permite que uma SMA se “lembre” de uma forma, sendo capaz de, após sofrer uma dada deformação, retornar a essa forma por meio de um aquecimento. A PE é uma propriedade em que a SMA, estando a uma dada temperatura, deforme quando sujeita à uma solicitação mecânica (carga), e retorne a sua forma original uma vez eliminada a carga. Essas propriedades conferem uma gama de aplicações às SMAs. Uma das áreas mais exploradas é o uso de SMAs como atuadores, podendo ser utilizadas para confecção de chaves eletrônicas, conectores eletrônicos, fios ortodônticos, fios guia, materiais ortopédicos, endopróteses, stents e outros [1-3]. Outras aplicações possíveis são: armação de óculos, conectores de tubos, controle de acionamento de válvulas, componentes para realização de cirurgias menos invasivas, filtros, aplicação em aerodinâmica e conformação de aerofólios, chassi de carros, entre outros [4-5]. Apesar da quantidade possível de usos, obstáculos para seu uso são em grande número.

Um dos desafios no uso de SMAs reside no controle de suas propriedades físicas e termomecânicas. Estas variam de acordo com a temperatura e composição da liga, bem como com a carga a que a liga está submetida. Assim, propriedades como resistência elétrica, módulo de elasticidade, condutividade térmica, susceptibilidade magnética, emissividade, coeficiente de Poisson, devem ter suas funções de dependência com a temperatura estabelecidas e analisadas para que se possa fazer uso prático das ligas com memória de forma. Aliado a isso, o custo relativamente elevado dessas ligas favorece o uso de tecnologias alternativas a SMAs. Contudo, estas variações podem ser exploradas para o desenvolvimento de aplicações. As SMAs mais importantes são as ligas de Níquel-Titânio (NiTi), Cobre-Zinco-Alumínio (CuZnAl) e Cobre-Alumínio-Níquel (CuAlNi), sendo a liga NiTi a de melhor relação custo-benefício[6]. A fabricação destas ligas é geralmente por fusão dos

metais que as compõem, sendo os métodos mais utilizados a fusão em arco de plasma, fusão por feixe de elétrons e fusão por indução a vácuo [7]. Todavia, devido à reatividade do Titânio, o processo de fusão deve ser realizado em forno a vácuo ou com atmosfera inerte (com Argônio, por exemplo). Processos de fabricação utilizando metalurgia do pó estão em desenvolvimento [7]. O enfoque deste trabalho será no controle das propriedades de materiais metálicos. Mais especificamente, o objetivo é conceber e projetar uma plataforma que permita levantar, de forma robusta, dados sobre uma das propriedades termomecânicas anteriormente mencionadas.

Materiais metálicos como o aço são bastante utilizados na indústria e em diversas outras aplicações. Um dos desafios no seu uso é que, frequentemente, é necessário conhecer a temperatura de um dado objeto metálico e este encontra-se em condições que impossibilitam a medida direta da temperatura. Desta forma recorre-se à meios remotos e indiretos de medição da temperatura. Contudo, esta tarefa não é nada fácil. Muitos são os fatores que podem influenciar numa medição de temperatura à distância. Surge aí a necessidade de um estudo com o intuito de contribuir para a melhor eficácia, acurácia e precisão na medida da temperatura de superfícies metálicas.

A propriedade que se deseja estudar neste trabalho é a emissividade. Será definida uma plataforma e um ensaio que permitam levantar empiricamente as curvas emissividade x temperatura para diversos corpos de prova (CPs) de materiais metálicos. Para teste e validação do projeto serão utilizadas barras de SMA de pequeno diâmetro (da ordem de 10 mm) com composição de NiTi e barras de aço polido. Com isso espera-se obter uma relação entre emissividade e temperatura que permita a aferição da temperatura de materiais metálicos, em especial SMAs, por métodos de radiação térmica.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal deste trabalho é conceber, projetar, construir e testar uma bancada para medição da emissividade de materiais metálicos e SMAs e avaliar a relação de dependência entre emissividade e temperatura destes materiais.

Como objetivos específicos deste trabalho pode-se citar:

- Estudar a propriedade emissividade e sua relação com materiais metálicos e SMAs;
- Estudar as formas existentes de medição de temperatura que fazem uso da radiação térmica emitida pelos materiais para realizar a medição;
- Verificar quais condições experimentais são necessárias para se obter medições consistentes de radiação térmica e emissividade;
- Definir quais ligas metálicas e de SMA serão utilizadas neste trabalho, bem como suas formas e dimensões;

- Conceber um aparato experimental capaz de medir a emissividade de materiais metálicos e SMAs;
- Estudar os procedimentos existentes para a medição de emissividade de materiais e adaptá-los ao uso neste trabalho;
- Especificar um meio de aquecimento dos materiais a serem utilizados como CPs (Corpos de Prova) neste trabalho;
- Projetar a bancada que será usada para realizar os ensaios sobre emissividade dos materiais. Isto envolve especificar componentes, sensores, sistema de aquecimento, sistema de medição, sistema de aquisição de dados, sistema de análise de dados e periféricos necessários para realizar os ensaios;
- Construir a bancada segundo o especificado, levando-se em conta limitações comerciais e de custo;
- Testar a bancada. Isto envolve realizar ensaios com os materiais especificados dentro da bancada utilizando o procedimento determinado;
- Analisar os resultados obtidos nos ensaios e compará-los com a teoria e com outros resultados existentes na literatura a fim de validar e demonstrar a confiabilidade da bancada.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O restante deste trabalho segue a seguinte ordem: o capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica a respeito de SMAs, detalhando funcionamento, propriedades e aplicações, bem como enfatizando a propriedade que será explorada neste trabalho, conceitos fundamentais sobre radiação térmica e emissividade, métodos de aferição de temperatura e aquecimento por efeito Joule; o capítulo 3 refere-se à concepção e projeto da bancada que será utilizada para levantamento empírico de dados dos CPs: serão definidos sensores, atuadores, modelos e demais variáveis necessárias para o funcionamento da plataforma; o capítulo 4 apresenta o procedimento de construção da bancada; o capítulo 5 apresenta o processo de teste e validação da bancada, bem como apresenta os principais pontos avaliados com relação à emissividade de SMAs e uma análise dos dados; o capítulo 8 apresenta as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros; o capítulo 9 são as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Aqui o leitor encontrará uma breve explanação sobre o tópico de SMAs, suas características, propriedades e o Estado da Arte da teoria e aplicações que envolvem SMAs.

2.1 O QUE SÃO LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Uma definição de Materiais Inteligentes (*Smart Materials*) é que são materiais que possuem ao menos uma propriedade que, por meio de um estímulo externo adequado, pode ser significativamente alterada. O estímulo externo pode ser de vários tipos[12]:

- Variação de temperatura;
- Corrente elétrica;
- Campo magnético;
- Aplicação de pressão ou tensões variadas;
- Outros.

Neste sentido, as ligas com memória de forma (LMFs), também chamadas de *Shape Memory Alloys* (SMAs), são um exemplo de material inteligente. Contudo, uma definição mais ampla do que pode ser chamado de ‘inteligente’ sugere que seriam materiais com capacidades de sensoriamento, atuação e controle. SMAs atuam como sensores de temperatura em função da variação de amortecimento, dureza, resistividade elétrica ou deformação. É o último aspecto que torna SMAs tão interessantes, visto que um efeito de deformação em função de uma variação de temperatura caracteriza a função de atuador da SMA. Entretanto, a ligação entre as funções de sensor e atuador anteriormente mencionadas não é muito clara. As características inerentes de sensoriamento e atuação são incapazes de interagir totalmente e formar um ciclo (*loop*) de controle sem intervenção externa. Destarte, SMAs talvez não possam ser consideradas como *Smart Materials* no senso estrito, mas é inegável que são um material diferenciado e com um grande potencial de aplicações [8]. Após esta breve discussão sobre a posição das SMAs no mundo de materiais inteligentes, pode-se delinear formalmente seu estudo.

SMAs são ligas metálicas que apresentam dois comportamentos marcantes: o Efeito Memória de Forma (EMF) e a Pseudoelasticidade (PE). A PE também é conhecida como Superelasticidade, mas este termo foi cunhado por motivos comerciais, de modo que neste trabalho sempre nos referiremos ao fenômeno como pseudoelasticidade. Estas duas propriedades permitem que estas ligas recuperem deformações de até 10% em alguns casos, em contraste com as deformações recuperáveis de 0.5% de

outras ligas metálicas [9]. A recuperação mencionada se dá por meio de um aquecimento no caso do EMF e por meio da remoção da carga aplicada no caso da PE. Ambos os fenômenos estão associados a uma transformação martensítica termoelástica.

2.2 COMPORTAMENTO E PROPRIEDADES DAS SMAS

Com o que foi dito até o momento, pode-se conceituar uma SMA da seguinte forma: é uma liga metálica especial, que possui dois comportamentos característicos, o EMF e a PE. Estes permitem que uma SMA possa ser deformada por aplicação de tensões, mas depois recuperar, retornar à sua forma original por meio de um aquecimento (EMF) ou retirada das tensões aplicadas (PE). Ambos fenômenos macroscópicos são explicados microscopicamente por transformações de fase. Uma SMA tem sua transformação de fase como sendo uma transformação martensítica termoelástica, o que significa que a liga pode passar de uma fase austenítica para uma martensítica e vice-versa, isto é, a transformação é cristalograficamente reversível. Além disso, a fase martensítica é do tipo maclada, o que significa que, quando é submetida a uma tensão, a liga se deforma favorecendo um tipo de martensita, sem que para isso sejam quebradas ligações entre átomos. Destarte, quando a tensão é removida, a liga é capaz de retornar a sua forma original. Ambos os fenômenos são independentes do tempo e fortemente dependentes da temperatura. Faremos agora um estudo do comportamento do EMF e da PE, bem como de outras propriedades intrínsecas às SMAs.

A relação entre a fase (austenita e/ou martensita) de uma SMA e a temperatura em que a liga se encontra pode ser vista na Figura 2.1 [10].

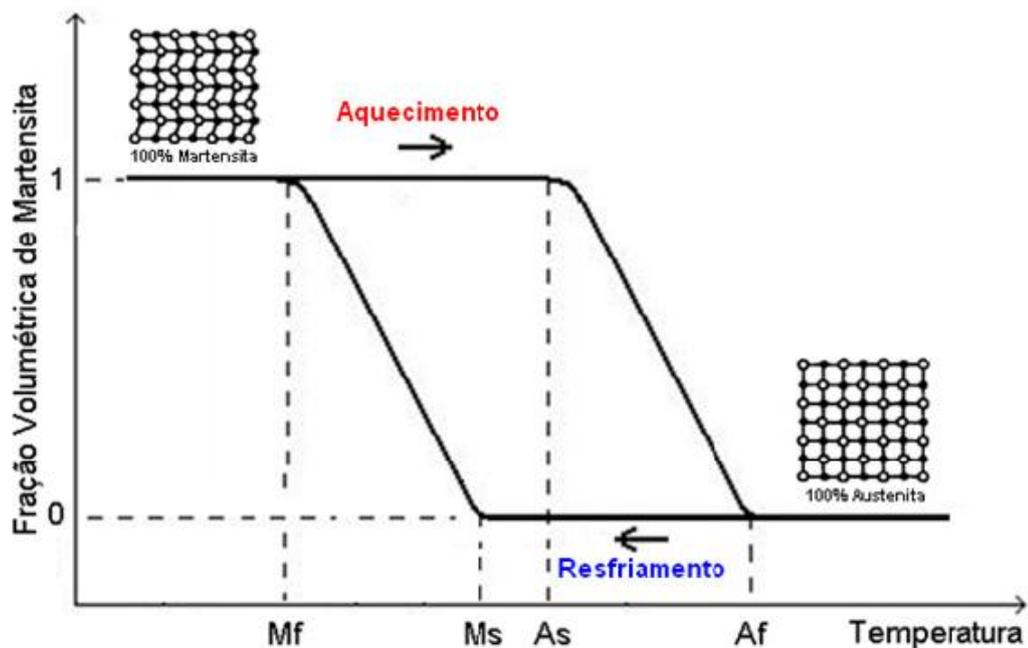


Figura 2.1 – Curva fração volumétrica de martensita no material versus temperatura. Destaque para as temperaturas de transformação e a histerese do processo [10].

Analisando a Figura 2.1 vê-se que há quatro valores de temperatura que descrevem as transformações de fase. Considere uma amostra de SMA em baixa temperatura e livre de tensões. Este material apresenta microestrutura martensítica maclada, como se pode observar no canto superior esquerdo da figura 2.1. Tem-se, nesse caso, uma estrutura 100% martensítica. Na medida em que se eleva a temperatura, a estrutura cristalina experimenta uma transformação de fase martensítica, de martensita (M) para austenita (A). Este processo se inicia em uma temperatura $T = A_s$ (Austenita inicial) e se desenvolve até que a temperatura $T = A_f$ (Austenita final) seja alcançada. Significa dizer que a transformação não ocorre em uma única temperatura, mas numa faixa de temperaturas, dentro da qual as fases coexistem no material. Atingida a temperatura A_f o material está 100% na fase austenítica. Se agora ocorrer uma diminuição na temperatura, o processo inverso ocorre, ou seja, o material irá passar de austenita para martensita. Este processo se inicia em uma temperatura $T = M_s$ (Martensita inicial) e se desenvolve até que a temperatura $T = M_f$ (Martensita final) seja alcançada. Importante ressaltar o alto grau de histerese deste processo, isto é, as temperaturas que induzem a transformação de fase de $M \rightarrow A$ não são as mesmas que induzem a transformação de $A \rightarrow M$. A histerese da transformação não é a mesma para todas as SMAs, e há maneiras de se diminuir o valor da histerese. Entretanto, certo grau de histerese sempre irá existir, visto que a histerese do processo é devida à energia irreversivelmente dissipada sob forma de atrito interno durante as transformações. Este processo de aquecimento e resfriamento do material a fim de induzir mudanças de fase e reversibilidade cristalográfica é o que chamamos Efeito Memória de Forma. A Figura 2.2 [10] ilustra mais precisamente como o EMF ocorre.

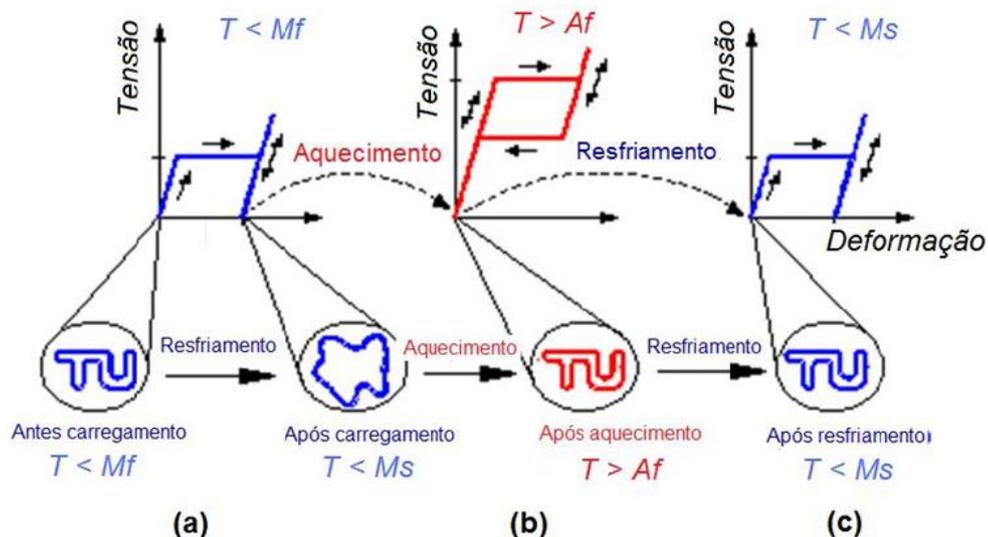


Figura 2.2 – Efeito Memória de Forma. Em 2.2 (a) tem-se um material em fase martensítica e baixa temperatura antes e após ser deformado (aplicação de carga). Em 2.2 (b) aquece-se o material acima de A_f , transformando a austenita em martensita, o que faz com que o material retorne a forma original. Finalmente em 2.2 (c) resfria-se novamente o material, de modo que este retorna à fase martensítica, mas mantendo a forma original [10].

Diversas aplicações nas mais variadas áreas [11] dependem dos efeitos mostrados na Figura 2.2.

A Figura 2.2 (a) tem uma amostra de SMA em fase martensítica (temperatura menor que M_f) e sem carga. Uma vez aplicada carga o material sofre uma deformação, no caso, uma demacção, visto que a aplicação de carga sobre martensita maclada favorece a formação de um tipo específico de martensita, mais estável na direção da carga aplicada. Assim, no final de 2.2 (a) temos uma martensita demacada e deformada. Em 2.2 (b) aqueceu-se a amostra acima de A_f , de modo que houve uma transformação de fase de martensita para austenita. Com a transformação, a amostra recuperou sua forma original. Finalmente, em 2.2 (c) resfria-se a amostra até abaixo de M_s , induzindo nova transformação de fase, dessa vez de austenita para martensita. Como a transformação de fase não favorece a nucleação de nenhum tipo específico de martensita, a fase produto é uma martensita maclada (fase em que os efeitos de direção dos tipos de martensita se cancelam). Este ciclo é o EMF.

Para abordar os aspectos da PE, é preciso analisar a relação entre tensão e deformação em uma SMA. As Figuras 2.3 e 2.4 [13] serão os guias.

Durante o processo de transformação de fase induzida por tensão, podem-se destacar dois tipos distintos de deformação que não ocorrem ao mesmo tempo. Estes são: deformação devido à nucleação de martensita (Bain) e deformação devido ao processo de reorientação ou demacção. No processo de demacção observa-se uma deformação macroscópica significativa devido ao crescimento da variante que possui a orientação mais favorável em relação à direção do carregamento.

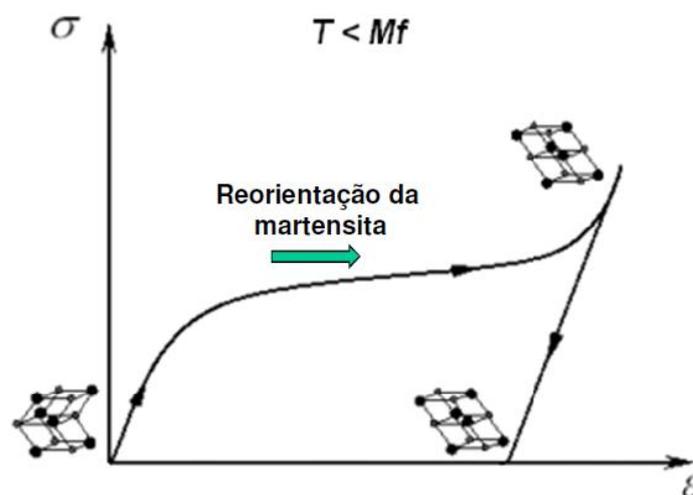


Figura 2.3 – Curva tensão versus deformação para uma amostra de SMA na fase martensítica (temperatura abaixo de M_f) [13].

Ao final do processo tem-se uma estrutura martensítica demacada. Este é o processo mostrado na Figura 2.3. Pode-se ver que numa temperatura inferior a M_f , a fase da SMA é a martensita maclada.

Uma vez aplicada uma tensão σ sobre o material, ocorre a deformação por reorientação, gerando uma estrutura martensítica demaçada. Vale notar que neste caso, como mostra a figura 2.3, após retirada da carga, a deformação não é eliminada e a estrutura permanece demaçada. Isto é a quasiplasticidade.

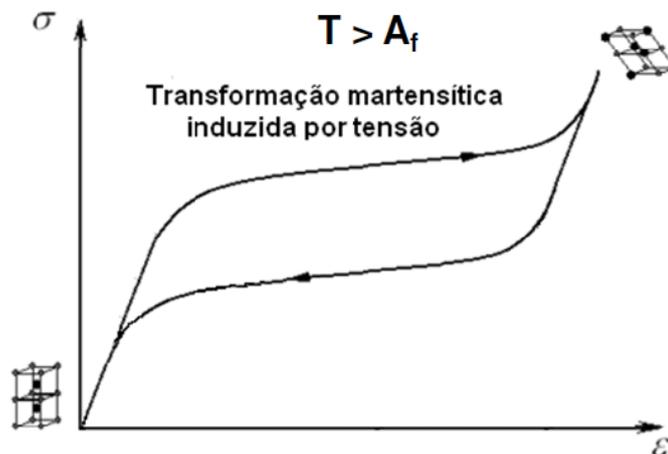


Figura 2.4 – Curva tensão versus deformação para uma amostra de SMA na fase austenítica (temperatura acima de A_f) [13].

A Figura 2.4 mostra o fenômeno da pseudoelasticidade (PE). Em uma temperatura acima de A_f , a fase de uma SMA é a austenítica. Uma vez imposta uma carga sobre a austenita, os dois tipos de deformação anteriormente mencionados ocorrerão. Haverá uma transformação de fase induzida por tensão de austenita para martensita. Como há uma carga atuando sobre o material, a transformação ocorrerá favorecendo a variante martensítica mais favorável à direção da carga aplicada. Assim, a transformação ocorre de austenita para martensita demaçada. Contudo, uma vez retirada a carga, a SMA volta para a fase de austenita, isto é, há uma transformação de fase de martensita para austenita. Quando isso ocorre, o material adquire sua forma original novamente. Assim, em uma temperatura acima de A_f , ao se aplicar uma tensão sobre uma SMA obtém-se deformação e ao retirar a carga há a recuperação desta deformação, isto é o fenômeno da PE. A Figura 2.5 [13] resume o EMF e a PE num gráfico temperatura versus carga.

O gráfico da Figura 2.5 mostra os dois ciclos que representam o EMF e a PE. O ciclo 1→2→3 da figura 2.5 é o EMF e o ciclo 3→4→5 é a PE. As Figuras 2.6 [13] e 2.7 [14] mostram a relação entre tensão, deformação e temperatura numa SMA.

A temperatura M_d vista na Figura 2.6 é a temperatura crítica de uma SMA. Acima de M_d não é mais possível induzir martensita por aplicação de tensão.

As Figuras 2.6 e 2.7 resumem o comportamento das SMAs, bem como revelam como as três variáveis (tensão, deformação e temperatura) se relacionam. As propriedades mecânicas das ligas com memória de forma variam enormemente através da faixa de temperaturas que alcançam.

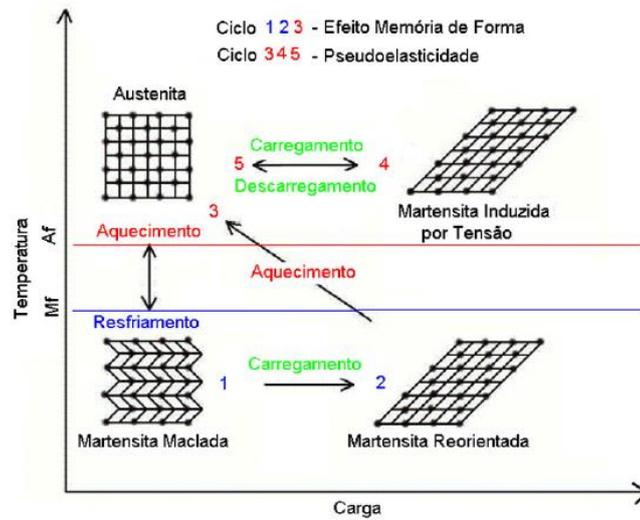


Figura 2.5 – Compilação gráfica do Efeito Memória de Forma e Pseudoelasticidade numa SMA [13].

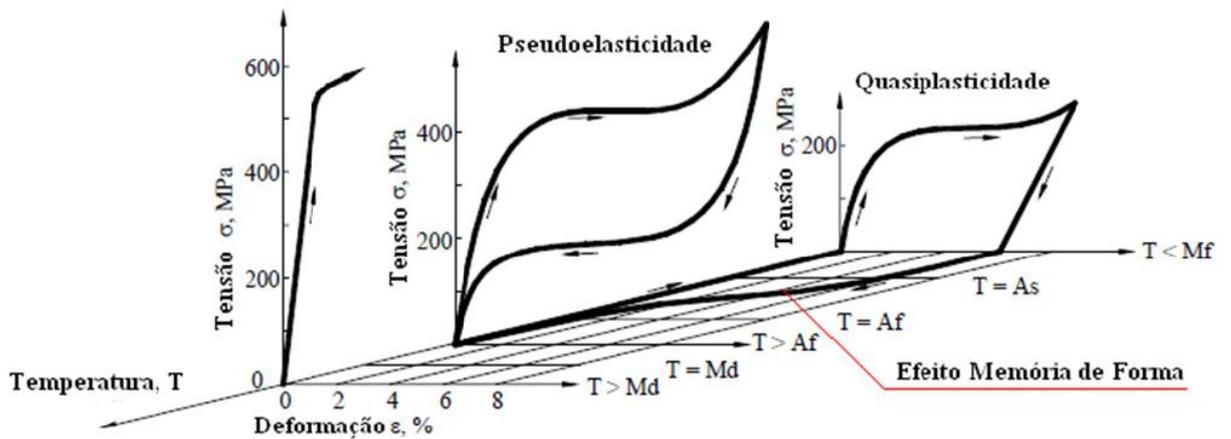


Figura 2.6 – Gráfico tensão versus deformação versus temperatura. O comportamento total de uma SMA é descrito analisando-se esse gráfico. O EMF e a PE estão destacados [13].

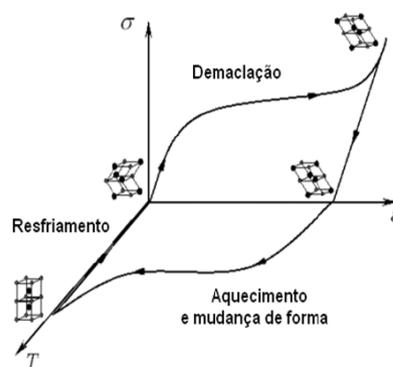


Figura 2.7 – EMF num gráfico tensão versus deformação versus temperatura [14].

Isto pode ser observado na Figura 2.8 [6], onde curvas de tensão versus deformação nos mostram o comportamento da liga NiTi quando tensionada para três diferentes temperaturas.

A Figura 2.8(b) mostra a quasiplasticidade, a 2.8(c) mostra a PE e a 2.8(a) o comportamento numa temperatura muito acima de A_f , onde não é mais possível induzir martensita por aplicação de tensão. Analisando a figura vemos que a martensita é mais facilmente deformada se comparada à austenita, que requer maior tensão para escoar. A linha tracejada em 2.8(b) corresponde ao retorno do material após elevar sua temperatura até o campo austenítico, de modo que a amostra retorne ao seu formato original. Outro ponto a se destacar é a imensa deformação imposta numa mesma tensão para o caso de 2.8 (c). O patamar AB indica uma grande deformação sob mesma tensão. Mesmo que a amostra de SMA esteja numa temperatura onde o efeito pseudoelástico pode ser observado, existe uma tensão máxima σ_{max} acima da qual o material sofre deformação plástica. Isto pode ser observado na Figura 2.9 [13].

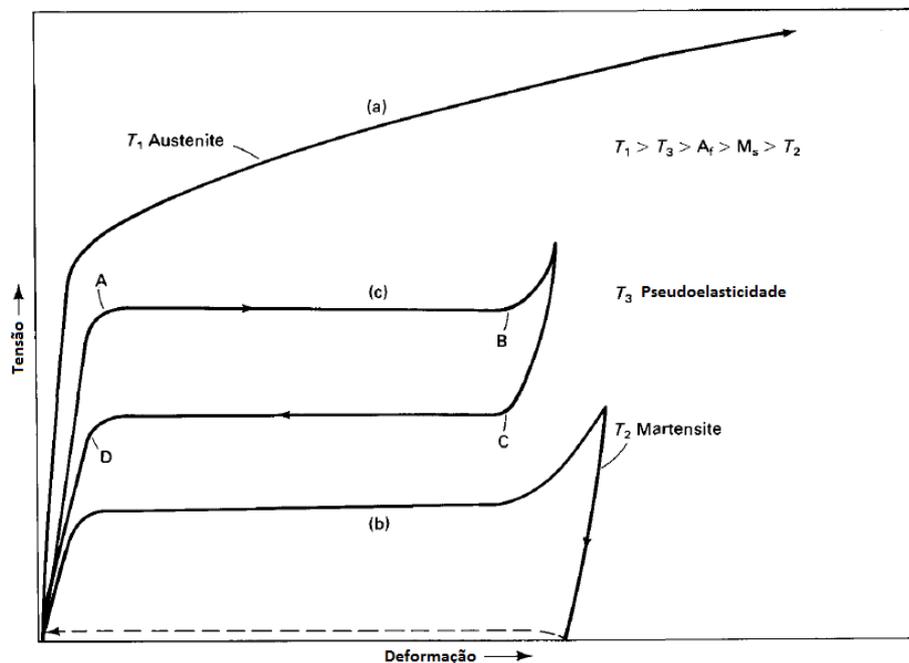


Figura 2.8 – Curvas tensão versus deformação em diferentes temperaturas. Em (a) a temperatura é bem maior que A_f , em (b) a temperatura é menor que M_f e em (c) a temperatura é maior que A_f [6].

A sequência $a \rightarrow b \rightarrow b' \rightarrow a'$ da Figura 2.9 representa o efeito pseudoelástico. No ponto 'b' quando se aumenta a tensão sobre o material, atinge-se o limite de escoamento, e então ocorre uma deformação plástica, como evidencia a sequência $b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e$. No topo da Figura 2.9 pode-se observar o que ocorre em termos de estrutura cristalina. Note que a deformação plástica corresponde a uma deformação microestrutural por escorregamento ao invés de maclação.

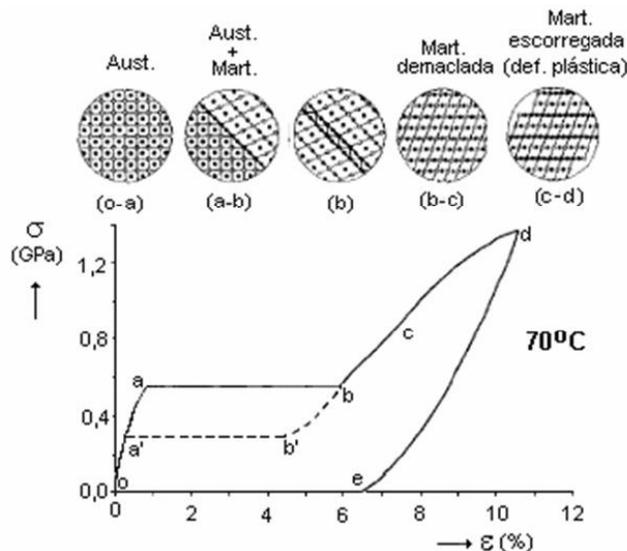


Figura 2.9 – curva tensão versus deformação em temperatura austenítica. A tensão de escoamento da liga é atingida e então ocorre deformação plástica [13].

2.3 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE RADIAÇÃO TÉRMICA

Há três meios conhecidos de transferência de calor: condução, convecção e radiação térmica. Os dois primeiros são modos de transferência de calor que necessitam de um meio material para a sua ocorrência. O terceiro meio, contudo, não necessita de um meio material para que ocorra. A transferência de calor por radiação será o objeto de estudo e interesse deste trabalho.

A emissão de radiação térmica é uma propriedade presente em todos os materiais e decorre do grau de agitação das moléculas do material. A energia interna de qualquer substância está diretamente ligada à temperatura desta substância. O mecanismo de emissão de radiação térmica por um material é resultado da emissão, liberação de energia das moléculas da matéria. Essa emissão de energia decorre de oscilações e transições dos vários elétrons que compõem a superfície. Essas oscilações, por sua vez, são sustentadas pela energia interna da matéria, que depende da temperatura. Assim, associa-se a emissão de radiação térmica às condições térmicas internas da matéria [16].

Para gases e sólidos semitransparentes a emissão de radiação térmica é considerada um fenômeno volumétrico, isto é, a radiação procedente de um determinado volume do material é a integral da emissão por todo o volume. Contudo, para os demais materiais, e para o interesse prático desta forma de transferência de calor, a emissão de radiação é considerada um fenômeno de superfície. Ocorre que em sólidos opacos e líquidos, a maior parte da radiação emitida por moléculas nas camadas mais internas do material acaba sendo absorvida por moléculas adjacentes. Assim, a radiação de fato emitida pelo material acaba por ser aquela emitida por moléculas que estão a até 1µm da superfície exposta e, portanto, tratamos a emissão de radiação como um fenômeno de superfície. A Figura 2.10 mostra esses efeitos.

Há duas teorias que visam explicar o que é essa radiação térmica. Uma teoria vê a propagação de radiação como uma coleção de partículas chamadas fótons ou quanta. Uma segunda teoria vê essa propagação na forma de ondas eletromagnéticas. Para ambas as teorias serão atribuídas características de onda para a radiação térmica, como padrão tem-se que (Equação 2.1):

$$c = \lambda f \quad (2.1)$$

onde λ é o comprimento de onda, f a frequência e c a velocidade da luz, que no vácuo vale 2.998×10^8 m/s.

O espectro eletromagnético completo pode ser visto na Figura 2.11. Vale notar que a faixa que compreende a radiação térmica engloba desde o ultra-violeta (UV), a faixa visível e todo o infravermelho (IR). Ela é chamada radiação térmica pois ela tanto afeta o estado térmico da matéria quanto é causada pelo estado térmico ou temperatura da matéria [16].

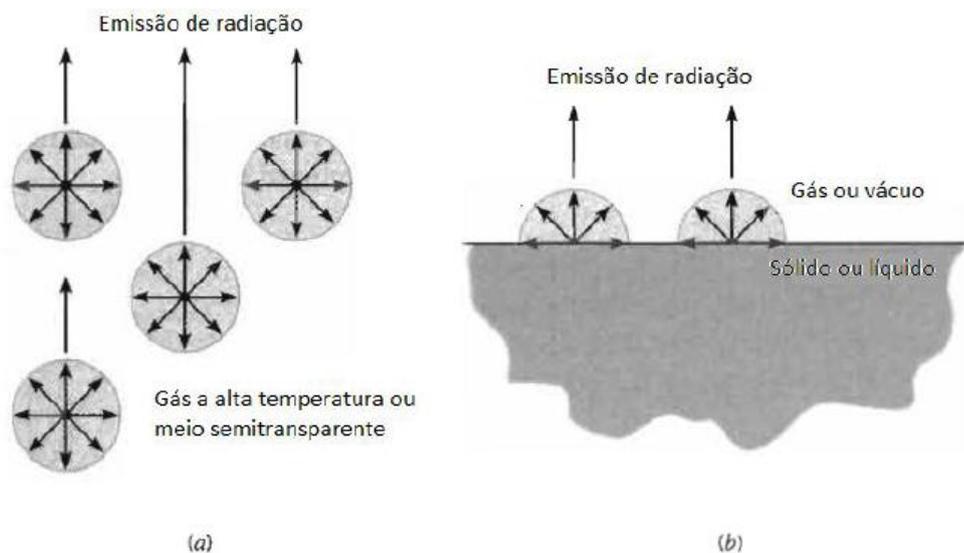


Figura 2.10 – Processo de emissão de radiação. (a) como fenômeno volumétrico. (b) como fenômeno de superfície [16].

O estudo da radiação térmica envolve duas relações de dependência: comprimento de onda e direção. A radiação emitida varia com o comprimento de onda e com a direção tridimensional em que ela é emitida a partir da superfície do corpo. Para estudo da emissão de radiação térmica por um corpo, alguns conceitos e definições serão introduzidos. A taxa com que a emissão a partir de um elemento de área na superfície de um corpo passa por um elemento de área numa dada direção e

distância da superfície pode ser expressa em termos da intensidade espectral $I_{\lambda,e}$ da radiação emitida.

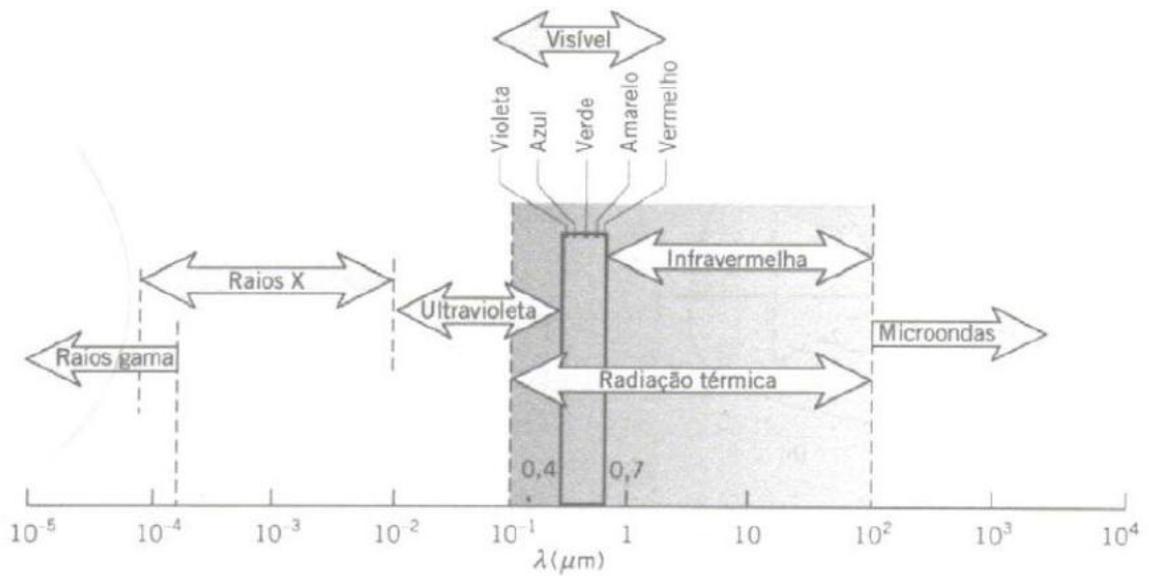


Figura 2.11 – Espectro eletromagnético [16].

Formalmente definimos $I_{\lambda,e}$ como a taxa na qual a energia radiante é emitida no comprimento de onda λ , na direção (θ, ϕ) , por unidade de área da direção normal a esta superfície, por ângulo sólido nesta direção e por unidade de intervalo de comprimento de onda $d\lambda$ ao redor de λ . A Fig. 2.12 ilustra a definição.

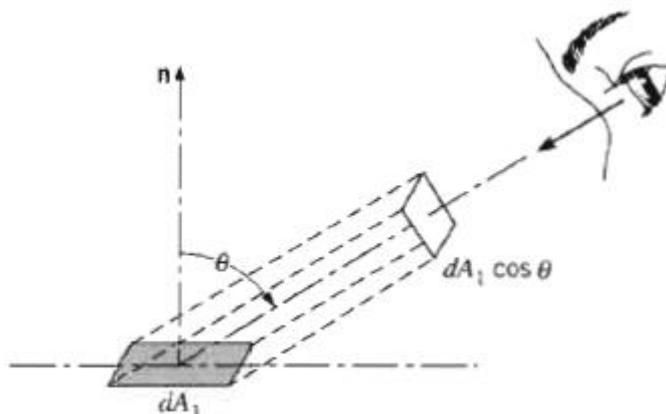


Figura 2.12 – Área pela qual se define a intensidade espectral [16].

A intensidade espectral é dada por (Equação 2.2):

$$I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \equiv \frac{dq}{dA_1 \cos \theta \cdot d\omega \cdot d\lambda} \quad (2.2)$$

onde $d\omega$ é a unidade de ângulo sólido e $dq/d\lambda$ é a taxa com que a radiação de comprimento de onda λ sai de dA_1 e passa por $dA_1 \cos \theta$. Contudo, para a maioria das aplicações em engenharia estamos interessados no poder emissivo total E do corpo, que é a integral da intensidade por todos os comprimentos de onda e todas as direções. O poder emissivo total é dado pela Equação 2.3:

$$E = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\phi \, d\lambda \quad (2.3)$$

Em geral consideramos a superfície como um emissor ideal, isto é, um emissor difuso, no qual a emissão de radiação é a mesma em todas as direções. Ao considerar que a emissão independe da direção, como no caso do emissor difuso, a Equação (2.3) pode ser simplificada para a Equação 2.4:

$$E = \pi I_e \quad (2.4)$$

onde I_e é a intensidade emissiva total.

Apesar de termos focado na emissão de radiação de um corpo, os conceitos tratados podem ser expandidos para a radiação térmica incidente em um corpo. A radiação incidente num corpo origina-se da emissão e reflexão de radiação ocorrendo em outras superfícies que estão ao redor do objeto de estudo. Todos os materiais estão constantemente emitindo, refletindo e absorvendo radiação térmica. O termo irradiação é usado para denotar o conjunto de todas as radiações térmicas que chegam ao material vindas de todas as direções. O termo radiosidade refere-se à soma de toda a radiação térmica que sai de uma superfície. É a soma da radiação emitida pela superfície com a porção refletida da irradiação, como pode ser visto na Fig. 2.13.

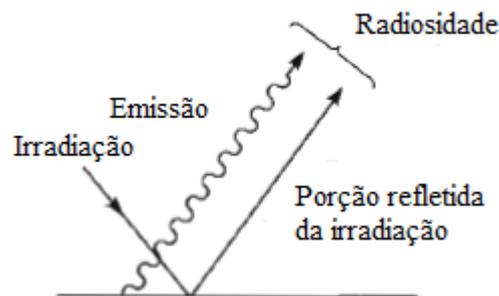


Figura 2.13 – Radiosidade [16].

Para poder avaliar o poder emissivo, a irradiação e a radiosidade de uma superfície real primeiro precisamos definir um padrão que nos permita resolver as equações para o valor da intensidade de radiação. Introduziremos então o conceito de corpo negro. Um corpo negro tem essencialmente três propriedades:

- 1) Absorve toda a radiação incidente, independentemente de direção ou comprimento de onda.
- 2) Para uma dada temperatura e um dado comprimento de onda nenhuma superfície emite mais radiação que um corpo negro.
- 3) Embora a radiação emitida por um corpo negro seja dependente da temperatura e do comprimento de onda, ela é independente da direção, ou seja, o corpo negro é um emissor difuso.

Como um perfeito emissor e absorvedor de radiação térmica, o corpo negro torna-se um padrão com o qual outras superfícies serão comparadas [16]. Vale notar que um corpo negro não precisa ser da cor preta, um corpo negro é uma abstração física e matemática para poder-se estudar o comportamento da radiação térmica. O sol, por exemplo, é considerado um corpo negro a 5800K.

2.4 LEIS DE PLANK, WIEN E STEFAN-BOLTZMANN

Vamos agora estudar as características espectrais de um corpo negro. A intensidade espectral de um corpo negro foi primeiro determinada por Max Planck conforme a Equação 2.5:

$$I_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5 [\exp(hc_0/\lambda kT) - 1]} \quad (2.5)$$

onde $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ e $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ são as constantes universais de Planck e Boltzmann, respectivamente; c_0 é a velocidade da luz no vácuo e T é a temperatura absoluta do corpo negro em Kelvin. Como o corpo negro é um emissor difuso segue a Equação 2.6:

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \pi I_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad (2.6)$$

onde a primeira e segunda constantes da radiação são $C_1 = 2\pi hc_0^2 = 3.742 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$ e $C_2 = (hc_0/k) = 1.439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$. A equação (2.6), conhecida como distribuição de Planck, está mostrada na Figura 2.14 [16].

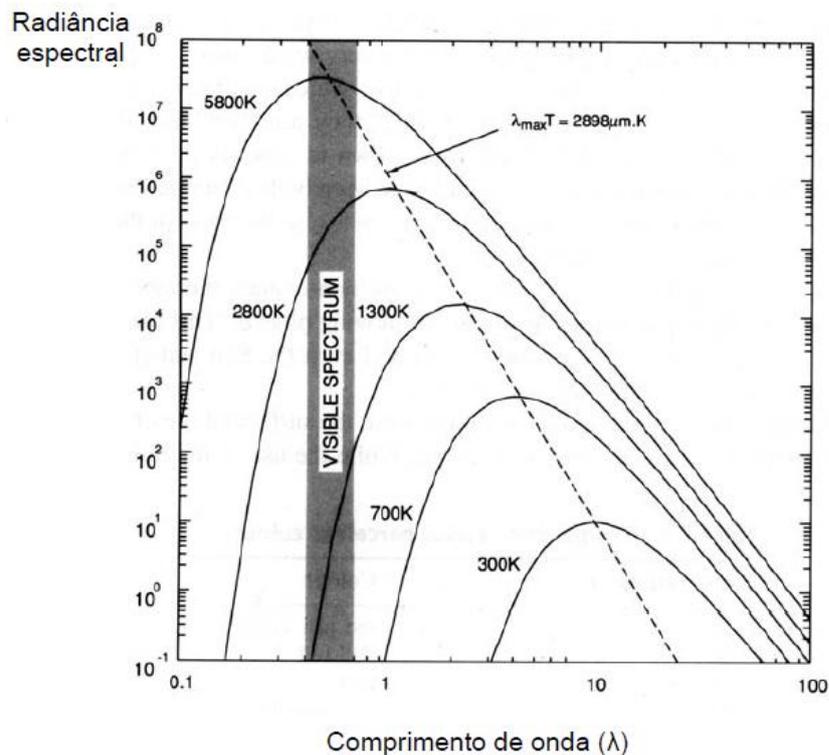


Figura 2.14 – Distribuição espectral de radiação para um corpo negro [17].

Algumas considerações importantes devem ser feitas. Primeiro notar que a radiação emitida varia continuamente com o comprimento de onda. Segundo que a magnitude de radiação emitida aumenta com o aumento de temperatura para qualquer comprimento de onda. Terceiro, a faixa do espectro em que a maior parte de radiação emitida se concentra depende da temperatura e se concentra em comprimentos de onda progressivamente menores com o aumento da temperatura. Quarto, na faixa de temperatura ambiente a radiação térmica emitida encontra-se na porção IR do espectro. Quinto, em comprimentos de onda menores que o de pico a inclinação da curva é bastante acentuada, ao passo que para comprimentos de onda maiores que os do pico a inclinação é pequena e quase linear.

Observando a Fig. 2.14 pode-se observar que existe um comprimento de onda $\lambda_{\text{máx}}$ 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 Eq. (2.6) e a igualando a zero. Obtém-se (Equação 2.7):

$$\lambda_{\text{máx}} T = C_3 \tag{2.7}$$

onde a terceira constante da radiação é $C_3 = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$.

A equação (2.7) é conhecida como Lei do deslocamento de Wien e a curva dessa Lei é mostrada como uma linha pontilhada na Fig. 2.14 [15]. Pode-se notar que $\lambda_{\text{máx}}$ diminui com o aumento da temperatura.

Substituindo a equação (2.6) na equação (2.3) e assumindo o corpo negro como um emissor difuso, isto é, a radiação térmica independe da direção, temos que o poder emissivo total de um corpo negro E_b pode ser expresso como (Equação 2.8)[16]:

$$E_b = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} d\lambda \quad (2.8)$$

E resolvendo-se a integral tem-se a Equação 2.9:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.9)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann, que depende das constantes C_1 e C_2 da radiação térmica e vale $5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$. Esse resultado é conhecido como Lei de Stefan-Boltzmann [16]. Sua importância reside no fato de que ela nos permite calcular o poder emissivo total de um corpo negro conhecendo apenas sua temperatura.

Agora que as características de um corpo negro foram estudadas e tem-se um arcabouço para o tratamento do comportamento emissivo de superfícies ideais, pode-se, então, avançar para o estudo de superfícies reais. Dentre as superfícies reais podemos encontrar boas aproximações de um corpo negro, contudo, as características de perfeito absorvedor de radiação e emissor difuso não são encontradas em superfícies reais. Assim, a dependência espectral e direcional de superfícies reais difere daquela determinada para um corpo negro. Isso pode ser visto na Figura 2.15[16].

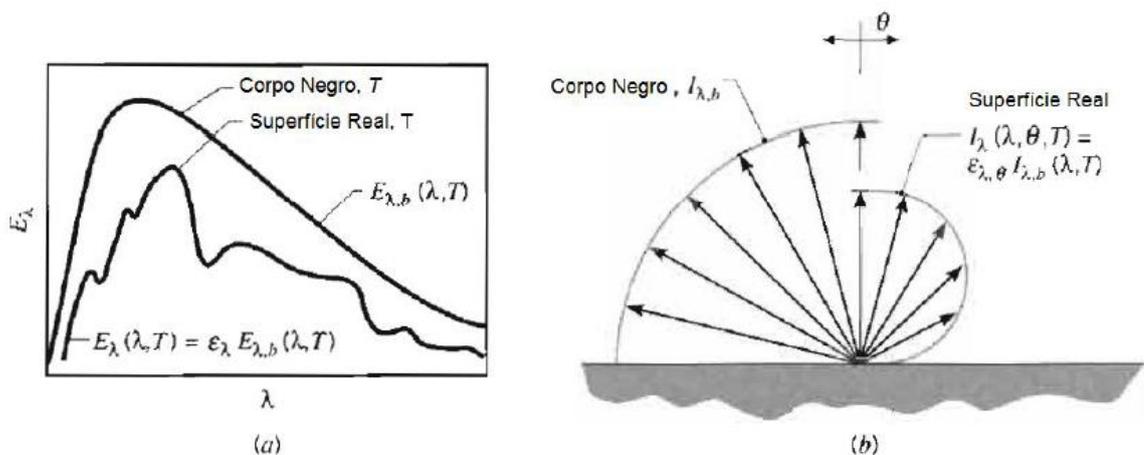


Figura 2.15 – Comparação de emissão de corpo negro e superfícies reais. (a) Distribuição espectral. (b) Distribuição direcional [16].

Pode-se observar na Figura 2.15 que o poder emissivo pode assumir diferentes valores dependendo do comprimento de onda ou da direção em que se interessa medir. Sabe-se que a uma dada temperatura, nenhuma superfície pode emitir mais radiação que um corpo negro, sendo assim, define-se a propriedade radiativa de materiais reais emissividade (ϵ) como sendo a razão entre a radiação emitida pela superfície real e aquela emitida por um corpo negro à mesma temperatura.

Define-se a emissividade espectral e direcional $\epsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi, T)$ para uma superfície real numa temperatura T como sendo a razão entre a intensidade de radiação emitida num comprimento de onda λ e numa direção (θ, ϕ) e a intensidade de radiação emitida por um corpo negro nas mesmas condições. Tem-se (Equação 2.10):

$$\epsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi, T) \equiv \frac{I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda,b}(\lambda, T)} \quad (2.10)$$

Entretanto, é conveniente calcular o poder emissivo total em todas as direções, como uma média direcional, e também por todos os comprimentos de onda, como uma média pelos comprimentos de onda. Assim, define-se a emissividade direcional total como apresentado na Equação 2.11:

$$\epsilon_{\theta}(\theta, \phi, T) \equiv \frac{I_e(\theta, \phi, T)}{I_b(T)} \quad (2.11)$$

E a emissividade hemisférica espectral total como descrito na Equação 2.12:

$$\epsilon_{\lambda}(\lambda, T) \equiv \frac{E_{\lambda}(\lambda, T)}{E_{\lambda,b}(\lambda, T)} \quad (2.12)$$

As Equações (2.11) e (2.12) descrevem a emissividade em função da direção e do comprimento de onda, respectivamente. Usando a equação (2.3) e relacionando a emissividade direcional e a espectral, pode-se deduzir a Equação 2.13:

$$\epsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T) \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,b}(\lambda, T) \cos \theta \sin \theta \, d\theta \, d\phi} \quad (2.13)$$

Fazendo uma aproximação que sugere que $\varepsilon_{\lambda,\theta}$ seja independente de ϕ , podemos reduzir a Equação 2.13 para a Equação 2.14:

$$\varepsilon_{\lambda}(T) = 2 \int_0^{\pi/2} \varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, T) \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (2.14)$$

A emissividade hemisférica total, que representa uma média sobre todas as direções e todos os comprimentos de onda possíveis, é definida como descrito na Equação 2.15:

$$\varepsilon(T) \equiv \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (2.15)$$

Substituindo as Equações (2.3) e (2.13) em (2.15) tem-se a Equação 2.16:

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) E_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda}{E_b(T)} \quad (2.16)$$

Desse modo, sabendo-se a emissividade de um material pode-se calcular seu poder emissivo espectral pela equação (2.14) ou seu poder emissivo total pela equação (2.15) [16].

Vale notar que a emissividade direcional de um emissor difuso é constante, independente da direção. Contudo, apesar de a aproximação de uma superfície real como um emissor difuso ser uma aproximação razoável na maioria dos casos, algumas considerações sobre variação da emissividade direcional devem ser feitas. A Figura 2.16 irá ajudar na explicação.

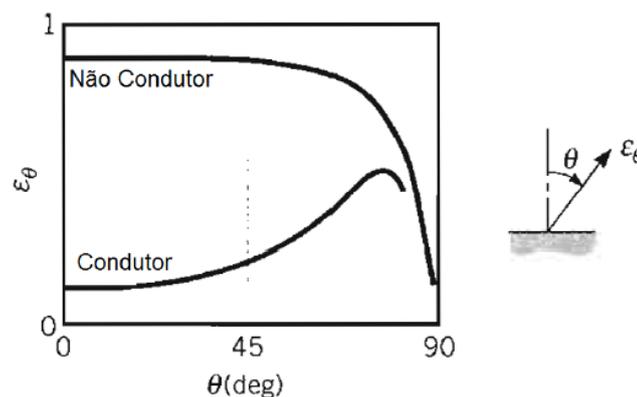


Figura 2.16 – Distribuições direcionais representativas da emissividade total direcional[16].

A Figura 2.16 mostra a variação da emissividade direcional em função do ângulo θ entre a normal à superfície e a direção examinada. Pode-se observar que para condutores a emissividade direcional se mantém aproximadamente constante para valores de $\theta < 40^\circ$, depois do qual a emissividade aumenta

conforme aumenta θ até que cai pra zero em $\theta = 90^\circ$. Ao contrário, não-condutores tem emissividade direcional constante para aproximadamente $\theta < 70^\circ$, depois do qual a emissividade cai bruscamente com o aumento de θ . Uma importante consequência dessa variação é que os valores de emissividade não vão variar muito do valor encontrado para $\theta = 0^\circ$, isto é, da emissividade na direção normal à superfície. Desse modo, uma aproximação plausível é fazer (Equação 2.17):

$$\varepsilon \approx \varepsilon_n \quad (2.17)$$

Um estudo amplo sobre a emissividade de superfícies reais permite citar algumas importantes generalizações:

- A emissividade de superfícies metálicas é, em geral, baixa.
- A presença de camadas de óxido pode alterar substancialmente a emissividade de materiais metálicos, elevando muito sua emissividade.
- A emissividade de não – condutores é comparativamente alta, geralmente excedendo 0.6.
- A emissividade de condutores aumenta com o aumento da temperatura, ao passo que a emissividade de não – condutores pode aumentar ou diminuir com o aumento da temperatura. Vai depender do material[16].
- A emissividade em materiais metálicos tende a diminuir com o aumento do comprimento de onda, ao passo que a emissividade de não condutores tende a aumentar com o aumento do comprimento de onda.
- A emissividade tende a ser maior em superfícies mais rugosas do que em superfícies menos rugosas [17].
- A emissividade é fortemente dependente da natureza da superfície, que pode ser influenciada pelo método de fabricação, ciclagem térmica e reações químicas com o ambiente [16].

Quando a energia de radiação térmica radiada por um objeto atinge um outro corpo, três coisas podem acontecer: absorção, reflexão e transmissão. A Figura 2.17 ilustra esses acontecimentos para um meio semitransparente.

Um corpo completamente opaco à radiação e totalmente não reflexivo irá absorver toda a radiação incidente. Esta é a característica de um corpo negro. A maioria dos sólidos são opacos à radiação térmica enquanto líquidos e gases são parcialmente opacos. Materiais metálicos tendem a ser bons refletores de radiação. Dado que há conservação de energia no meio, denotando-se absorção por ‘a’, reflexão por ‘r’ e transmissão por ‘t’ tem-se que (Equação 2.18):

$$a + r + t = 1$$

(2.18)

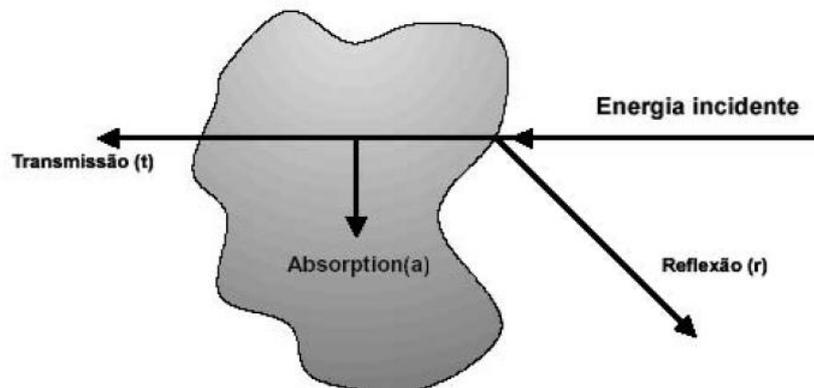


Figura 2.17 – Absorção, reflexão e transmissão de radiação incidente em um corpo [17].

Em geral a determinação destes componentes é difícil, pois depende da temperatura, comprimento de onda, características do material e da sua superfície. Quando o meio é opaco, assume-se $t = 0$ e apenas as componentes de absorção e reflexão estão presentes. A quantidade de radiação absorvida pelo corpo é responsável pelo aumento da sua temperatura.

2.5 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

2.5.1 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE TEMPERATURA

A Temperatura é uma das grandezas físicas mais importantes de ser conhecida e medida, visto que ela influi diretamente em uma gama enorme de propriedades e estados de todas as substâncias. A medição da temperatura de um objeto é um dos desafios mais estudados há séculos. Só o tempo é mais monitorado por sistemas de medição do que a temperatura, contudo, há mais estudos referentes à correta medição da temperatura.

A Temperatura, juntamente com o comprimento, tempo e massa formam as grandezas físicas fundamentais e independentes reconhecidas pelo IMS (*International Measurement System*). Os padrões para as outras grandezas são derivados destas [18].

A temperatura é ligada a área da física chamada termodinâmica e é um dos fundamentais indicativos do estado termodinâmico de um objeto. A temperatura visa ser uma medida da magnitude de energia interna de um corpo ou sistema.

Um sistema termodinâmico consiste geralmente numa certa quantidade de matéria contida num recipiente. O sistema é dito isolado caso não haja trocas térmicas entre ele e o ambiente que o rodeia. Um sistema isolado é definido por suas características macroscópicas de pressão (P), volume (V) e

temperatura (T). É fato empírico que um sistema isolado sempre tende a um estado que nenhuma de suas variáveis macroscópicas muda com o tempo. Quando ele atinge este estado, diz-se que está em equilíbrio térmico [19].

Dois sistemas são ditos estar em contato térmico quando há troca de calor entre eles. Quando dois sistemas estão em contato térmico eles tendem a trocar calor entre si até que as propriedades de ambos os sistemas não mais variem com o tempo, isto é, até que atinjam o equilíbrio térmico. Dois sistemas em equilíbrio térmico são ditos estarem a mesma temperatura.

Suponha três sistemas A, B e C. A Lei zero da termodinâmica afirma que, se A está em equilíbrio térmico com B e A está em equilíbrio térmico com C, então B está em equilíbrio térmico com C. Esse é o princípio básico de medição de temperatura, busca-se um sistema de referência A o qual coloca-se em contato térmico com outros sistemas e, uma vez estabelecido o equilíbrio térmico entre eles, pode-se dizer que estão na mesma temperatura.

Embora conceitualmente simples, conhecer a temperatura de objetos reais pode se mostrar bastante desafiador. Há diversas limitações dos sistemas de referência, como grau de incerteza por medida indireta, sensibilidade do sistema, características de tamanho, forma e acessibilidade do sistema que se deseja conhecer a temperatura. O objetivo deste trabalho é definir um aparato e procedimento robustos capazes de medir a temperatura de um objeto e relacioná-la à emissividade deste objeto.

Há diversas formas e diversos sistemas de referência, ou termômetros, que podem ser utilizados para medir a temperatura de um objeto. Sendo que esses meios geralmente envolvem uma medição indireta da temperatura, isto é, a temperatura é derivada da alteração de alguma outra grandeza física. Exemplos são os métodos de expansão térmica de metais, como nos termômetros bimetalícos, de fluidos, como o termômetro de mercúrio, de gás, métodos termoeletrônicos como termopares, termistores, e dispositivos que se utilizam de radiação térmica[19].

Em termos práticos pode-se dividir os métodos de medição de temperatura em: invasivo, semi-invasivo e não-invasivo.

2.5.2 MÉTODOS INVASIVOS DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA

Os métodos invasivos contemplam os diversos termômetros nos quais o detector ou transdutor do sensor estão em contato direto com o objeto ou meio que se deseja medir a temperatura. Deste modo, diz-se que o sensor de temperatura (nome mais amplo para termômetro) invade o campo de medições. Consequência desta natureza de medição é que, na maioria dos casos o ato da medição influencia na temperatura do objeto de interesse. Exemplos são: termômetros de líquido em recipiente de vidro, termopares, termistores, RTDs (*Resistance Temperature Detectors*), termômetro de gás.

Os termômetros invasivos mais utilizados em aplicações de engenharia são os termopares. Um termopar consiste da união de dois fios de metais distintos que por sua vez entram em contato com o

objeto de interesse. Termopares são largamente utilizados devido ao seu baixo custo, excelente sensibilidade, dimensões reduzidas, alta resistência a condições ambientais desfavoráveis, ampla gama de opções com uma larga amplitude de precisões e fundos de escala, além de serem de fácil calibração e manutenção.

Os termopares baseiam-se no efeito Seebeck para efetuar a medida. Este efeito diz que dois materiais condutores (ou semicondutores) quando submetidos a um gradiente de temperatura produzem uma tensão elétrica em seus terminais. A Figura 2.18 ilustra o efeito Seebeck.

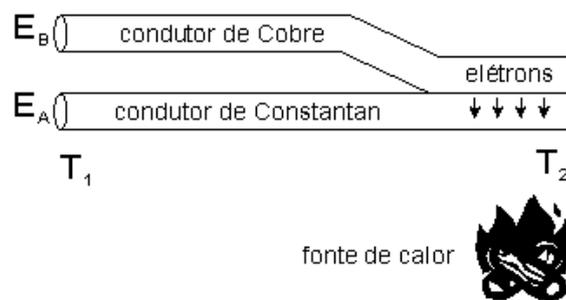


Figura 2.18– Efeito Seebeck em um termopar tipo T[19].

O gradiente de calor induz uma migração dos elétrons dos condutores, gerando uma tensão nos terminais do termopar. A tensão gerada é dada pela Equação 2.19:

$$Fem = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT \quad (2.19)$$

onde Fem é a força eletro-motriz e As e Sb são os coeficientes de Seebeck dos metais A e B.

2.5.3 MÉTODOS SEMI-INVASIVOS DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA

Os métodos semi-invasivos comportam as técnicas em que há algum tratamento ou modificação da superfície de interesse para que seja possível a medição. Em geral faz-se uso de uma tinta ou outra substância para modificar as propriedades do objeto de interesse com o intuito de ser possível monitorar a temperatura do objeto a distância. Exemplos são: cristais líquidos termocrômicos, tinta termocrômica, sólidos cristalinos sensíveis à temperatura [5].

2.5.4 MÉTODOS NÃO – INVASIVOS DE MEDIÇÃO DA TEMPERATURA

Os métodos não – invasivos são aqueles em que a temperatura do objeto de interesse é monitorada remotamente. A termometria infravermelha é a técnica não-invasiva mais utilizada. Outras formas de monitoramento remoto foram desenvolvidas, como técnicas baseadas no índice de refração,

fluorescência e acústica. Contudo, como dito, o objeto deste trabalho é relacionar temperatura com emissividade, portanto o método de medição de temperatura que será explorado é o método por radiação infravermelha.

2.5.5 FUNCIONAMENTO E TIPOS DE RADIÔMETROS INFRAVERMELHOS

A termometria infravermelha se utiliza da propriedade emissiva de radiação térmica de qualquer material para operar. Em termos gerais, tem-se que qualquer objeto emite radiação térmica que por sua vez está ligada diretamente à temperatura do objeto. Sendo assim, o termômetro infravermelho mede a quantidade de radiação provinda de um objeto e usa as relações físicas de poder emissivo conceituadas na seção anterior para estimar a temperatura do objeto.

Como dito na seção anterior, a propriedade de um objeto real ligada à emissão de radiação térmica é a emissividade. Destarte, o termômetro infravermelho utiliza a emissividade do objeto para estimar sua temperatura. Ao substituir a Equação (2.9) na Equação (2.15) e isolarmos o poder emissivo total obtém-se a Equação 2.20:

$$E = \varepsilon\sigma T^4 \quad (2.20)$$

onde E é o poder emissivo total, que é medido pelo termômetro infravermelho, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e ε a emissividade do objeto. Com isso o medidor é capaz de estimar a temperatura T do objeto.

Termômetros infravermelhos podem ser classificados nas seguintes categorias:

- a) Termômetros de banda espectral;
- b) Termômetros de radiação total;
- c) Termômetros de razão;
- d) Termômetros multi-bandas;
- e) Termômetros de propósito especial;
- f) Imagem térmica [5].

a) Termômetros de banda espectral são os mais comumente utilizados. Eles medem a energia radiada por uma superfície entre $0,5\mu\text{m}$ e $25\mu\text{m}$ de comprimento de onda. São termômetros de alta sensibilidade [5].

b) Termômetros de radiação total medem toda a radiação térmica emitida pelo corpo. Operam numa banda ampla de comprimentos de onda e são geralmente usados em aplicações de baixa temperatura, quando a radiação emitida não é tão grande.

c) Termômetros de razão, também chamados termômetros de bi-banda medem a quantidade de radiação térmica emitida em duas faixas de comprimento de onda e calcula a razão entre elas. A vantagem desse tipo de medidor é que não se faz necessário o conhecimento da emissividade do objeto alvo.

d) Termômetros multi-bandas permitem a medição da temperatura da superfície quando a emissividade não é constante ao longo dos comprimentos de onda.

e) Termômetros de propósito especial incluem métodos de radiação polarizada, métodos de reflexão e outros. Foram desenvolvidos com o intuito de se obter uma medida da temperatura independentemente do valor da emissividade.

f) Imagem térmica são câmeras sensíveis à radiação térmica. Elas permitem a avaliação da temperatura de um objeto ao longo de uma dada área. A distribuição de temperaturas na imagem deve ser avaliada com cuidado, visto que as câmeras utilizam-se de um único valor de emissividade para toda a imagem, e não necessariamente há um único material sendo captado[5].

2.6 AQUECIMENTO POR EFEITO JOULE E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Um último tópico teórico se faz necessário para este trabalho. No decorrer do experimento pretende-se aquecer barras cilíndricas de materiais metálicos e aplicar um procedimento que permita estimar a emissividade destes materiais em temperaturas que variam de 20°C a 90°C. Por este motivo faz-se necessário discutir sobre aquecimento por efeito joule e conservação de energia.

Pretende-se aquecer as barras metálicas fazendo circular por elas corrente elétrica. Para tanto precisa-se entender como se dá o aquecimento de materiais desta forma.

O princípio da conservação de energia diz que a energia nunca é perdida ou destruída, ela é apenas transformada. Segundo este princípio, é possível explorar a energia elétrica de modo a transformá-la em energia térmica que aqueça os corpos de prova (CPs).

Em termos termodinâmicos, ao se passar uma corrente elétrica I por uma barra metálica a corrente irá aquecer a barra por efeito Joule. O efeito Joule diz que a passagem de corrente elétrica por um elemento resistivo faz com que este dissipe energia na forma de calor. A barra é um elemento predominantemente resistivo, de modo que a passagem de corrente lhe entregará energia térmica.

Por outro lado a superfície da barra está em contato com o meio e vai dissipar a energia ganha para o meio por convecção e radiação, predominantemente. Aqui, cujo foco é a correta e precisa mensuração da temperatura e emissividade, optou-se por realizar o experimento no vácuo. Assim, a perda de calor da barra se dará somente por radiação térmica. A Figura 2.19 ilustra a barra metálica.

A Figura 2.19 mostra um cilindro de comprimento L e diâmetro D, que é atravessado por uma corrente I e que perde calor por emissão térmica \dot{E}_{out} . Usando a primeira Lei da termodinâmica pode-se equacionar o saldo de energia térmica no cilindro como mostrado na Equação 2.21:

$$\dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (2.21)$$

onde E_g é a energia fornecida ao cilindro pela corrente elétrica, E_{out} é a energia perdida pelo cilindro para o meio por emissão de radiação e E_{st} é o saldo de energia interna do cilindro.

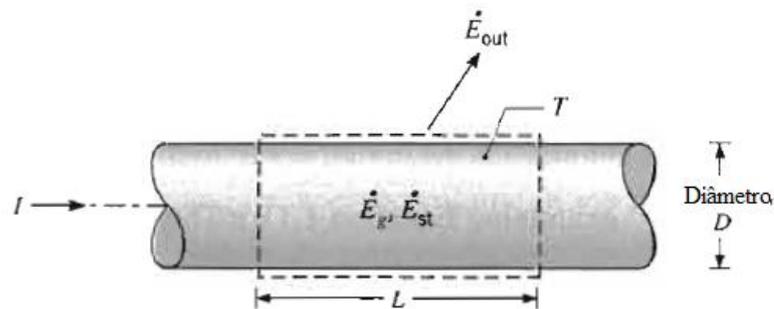


Figura 2.19 – Cilindro metálico aquecido por corrente elétrica[16].

Sabe-se que a energia fornecida pela corrente pode ser modelada pela Equação 2.22:

$$\dot{E}_g = I^2 R'_e L \quad (2.22)$$

onde I é a corrente e R'_e a resistividade elétrica do cilindro. Assumindo o aquecimento como sendo uniforme ao longo do tempo, pode-se estimar a energia dissipada como (Equação 2.23):

$$\dot{E}_{out} = \varepsilon \sigma (\pi D L) (T^4 - T_{sur}^4) \quad (2.23)$$

onde T_{sur} é a temperatura ambiente. A mudança interna de energia do cilindro, referente à mudança dos valores das variáveis macroscópicas que definem o estado termodinâmico de um material (seção 2.5.1), pode ser dada pela Equação 2.24:

$$\dot{E}_{st} = \frac{dU_t}{dt} = \frac{d}{dt} (\rho V c T) \quad (2.24)$$

onde V é o volume do cilindro, U_t é a energia interna do cilindro, c é a condutividade térmica do cilindro e ρ é a densidade do cilindro. Substituindo as equações de (2.22) a (2.24) na equação (2.21) tem-se a Equação 2.25:

$$I^2 R'_e L - \varepsilon \sigma (\pi D L) (T^4 - T_{sur}^4) = \rho c \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) L \frac{dT}{dt} \quad (2.25)$$

Como o objetivo é aquecer o cilindro até determinadas temperaturas, é razoável supor o caso em que o cilindro atinge regime estacionário para uma dada temperatura T . Nesse caso $dT/dt = 0$. Resolvendo a Equação (2.25) para I e considerando regime estacionário tem-se (Equação 2.26):

$$I = \sqrt{\frac{\pi D \sigma \varepsilon (T^4 - T_{sur}^4)}{R'_e}} \quad (2.26)$$

Com o intuito de projetar um sistema de potência deixa-se aqui também as equações elétricas pertinentes (Equações 2.27 e 2.28):

$$V_t = R \cdot I \quad (2.27)$$

$$Pot = V_t \cdot I = R \cdot I^2 \quad (2.28)$$

onde V_t é a tensão nos terminais, R a resistência elétrica, I a corrente que circula no circuito e Pot a potência dissipada na resistência R ou fornecida pela fonte de tensão V_t .

A equação (2.27) é a Lei de Ohm e a equação (2.28) é a relação entre tensão, corrente e potência de um sistema elétrico.

Com essas considerações encerra-se a revisão bibliográfica necessária para a realização e entendimento do trabalho. Passa-se agora para a realização do projeto.

3 CONCEPÇÃO E PROJETO DA BANCADA

O presente capítulo apresenta os materiais usados na construção do aparato de medição, os procedimentos utilizados nos ensaios e a discussão dos pontos do projeto que visam melhorar o desempenho deste.

3.1 METODOLOGIA

O presente trabalho se propõe a conceber um aparato e procedimento para o levantamento da relação de dependência entre emissividade e temperatura de materiais metálicos. O primeiro passo foi definir quais metais seriam estudados. Definiram-se dois materiais: um aço polido e uma SMA de NiTi. A primeira escolha é um material cuja emissividade já é conhecida na literatura e o segundo é um material cuja emissividade não é conhecida na literatura e especula-se que tenha um comportamento bastante diferenciado dos metais comuns. O interesse é utilizar o aço para validar tanto aparato quanto procedimento, comparando-se os resultados obtidos com os já existentes na literatura para, uma vez validado o experimento, utilizá-lo para levantar a dependência entre emissividade e temperatura de materiais cuja emissividade não está definida na literatura. O material de NiTi tem grandes possibilidades de compor numerosas novas aplicações uma vez que seja possível determinar sua temperatura por métodos não-invasivos com robustez.

Definidos os materiais a serem estudados o segundo passo é revisar a metodologia que deve ser empregada na determinação da emissividade de um objeto. Tomou-se por base duas normas internacionais: JIS A 1423 e ASTM E1933-99a.

A norma JIS A 1423 refere-se à *Japanese Industrial Standard, Simplified test method for emissivity by Infrared Radio Meter*, que, em tradução livre, é o padrão industrial japonês, Método simplificado de teste de emissividade por radiômetro infravermelho[20].

A norma ASTM E1933-99a refere-se à *American Society for Testing and Materials, Standard test methods for measuring and compensating for emissivity using Infrared imaging radiometers*, que, em tradução livre, é Sociedade Americana para testes e materiais, Métodos padrão para mensuração e compensação de emissividade utilizando radiômetros de imagem infravermelha[21].

Aqui serão explicados os pontos principais das normas bem como suas sugestões de procedimentos e suas deficiências.

A norma japonesa sugere dois métodos para a medição da emissividade de um objeto, a serem utilizados concomitantemente. Primeiro ela define os conceitos de emissividade e termômetro de radiação infravermelha. Depois define quais seriam as dimensões e forma ideais para um corpo de prova de um dado material. Então, com a amostra em mãos deve-se pintar um lado da amostra com tinta termocrômica preta ou similar, com a condição de ser uma substância de emissividade conhecida

e superior a 0.95 (método semi-invasivo). Daqui em diante essa porção da amostra será chamada de “parte transformada em corpo negro”.

Em seguida define as condições estruturais do aparato experimental. Este deve ser composto por uma câmara com vácuo, deve ter os sensores infravermelhos posicionados numa inclinação máxima de 2° com relação a normal da superfície da amostra. A amostra deve ser aquecida por um banho de caldeira e fluido que elevem uniformemente a temperatura da amostra e sejam capazes de manter a temperatura selecionada constante. Todo o aparato deve ser coberto com uma cortina tipo blackout. A amostra deve ter 6(seis) termopares acoplados a ela por toda a sua extensão e ao menos dois sensores infravermelhos apontados um para a porção original da amostra e outro para a porção transformada em corpo negro.

Com o aparato pronto o procedimento consiste em, uma vez atingido o vácuo e equilíbrio térmico no interior da câmara, 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. Anote essa temperatura como T_b .

2) Após, medir a temperatura na porção original da amostra com o outro sensor infravermelho, estando este com emissividade ajustada em 1 (que corresponde à emissividade de um corpo negro). Anote essa temperatura como T_i .

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} e T_{i2} .

A emissividade será então calculada conforme a Equação 2.29:

$$\varepsilon = (T_{i2} - T_i) / (T_{b2} - T_b) \quad (2.29)$$

O método proposto pela norma americana é similar, no entanto ela divide o método japonês como dois métodos distintos e válidos.

A norma americana faz considerações similares acerca dos conceitos de emissividade e termometria infravermelha às feitas pela norma japonesa. Superada esta etapa a norma americana define quais as dimensões e formas ideais para a amostra. Ao contrário da norma japonesa, que especifica apenas uma chapa retangular fina como amostra ideal, a norma americana prevê o uso de superfícies cilíndricas para aplicação dos métodos de medição de emissividade.

A norma americana propõe então dois métodos.

Método A: de posse da amostra e do sistema de aquecimento mais apropriado ou viável para o caso específico, desde que se garanta que ele eleve a temperatura da amostra uniformemente, mantenha a amostra sem influência de radiações externas cobrindo-a com uma cortina tipo blackout. Ao que se seguem os passos:

- 1) Depois pinte uma parte da amostra com tinta de emissividade conhecida. Tintas termocrômicas costumam ter emissividade de 0,95 ou 0,97;
- 2) Posicione dois sensores infravermelhos na direção normal à superfície da amostra, um mirando a parte da amostra com tinta e outro mirando a parte da amostra sem tinta;
- 3) Ajuste a emissividade do sensor voltado para a parte pintada para o valor da emissividade da tinta;
- 4) Arbitre uma emissividade para o outro sensor;
- 5) Use o dispositivo de aquecimento para elevar a temperatura da amostra para ao menos 10°C a mais que a temperatura ambiente e espere o sistema entrar em equilíbrio térmico;
- 6) Leia a temperatura da amostra na parte com tinta no sensor infravermelho e verifique se condiz com a temperatura ajustada pelo sistema de aquecimento;
- 7) Ajuste a emissividade do sensor voltado para a parte sem tinta da amostra até que o valor lido por este sensor coincida com o valor lido pelo outro sensor. A emissividade ajustada neste passo é a emissividade da amostra.

Método B: de posse da amostra e do sistema de aquecimento mais apropriado ou viável para o caso específico, desde que se garanta que ele eleve a temperatura da amostra uniformemente, mantenha a amostra sem influência de radiações externas cobrindo-a com uma cortina tipo blackout. Ao que se seguem os passos:

- 1) Posicione um termopar calibrado na superfície da amostra;
- 2) Posicione um sensor infravermelho na direção normal à superfície da amostra;
- 3) Arbitre uma emissividade para o sensor IR;
- 4) Use o dispositivo de aquecimento para elevar a temperatura da amostra para ao menos 10°C a mais que a temperatura ambiente e espere o sistema entrar em equilíbrio térmico;
- 5) Leia a temperatura do termopar e registre;
- 6) Ajuste a emissividade do sensor IR voltado para a amostra até que o valor lido por este sensor coincida com o valor lido pelo termopar. A emissividade ajustada neste passo é a emissividade da amostra.

Estas são as normas e procedimentos que foram utilizadas como base para este trabalho. Algumas ponderações:

- Ambas normas buscam a medida de um único valor de emissividade a uma dada temperatura. O objetivo aqui é levantar uma curva de dependência entre emissividade e temperatura, medindo a emissividade para vários pontos ao longo da faixa 20°C até 90°C;

- A norma japonesa se mostrou rigorosa em excesso na medida da emissividade, visto que os dois métodos propostos pela norma americana são eficazes;

- Ambas normas reiteram a importância de se medir a emissividade livre de influências externas de irradiação, condução e convecção, para que haja a máxima transferência de calor por radiação térmica e a medida do sensor seja a mais precisa possível;

- Ambas indicam a impossibilidade de se medir corretamente a emissividade à temperatura ambiente.

Tendo esses métodos por base serão definidos um aparato e procedimento que atendam aos requisitos deste trabalho.

Uma vez que as temperaturas de operação deste experimento são baixas (293,15 – 363,15 K), o método escolhido de aquecimento das amostras foi o de aquecimento por corrente elétrica. Visto que ambos materiais são predominantemente resistivos, optou-se por usar-se do efeito Joule para o aquecimento. Para tanto foram definidas as dimensões dos CPs como cilindros de 10mm de diâmetro por 100mm de comprimento. O sistema de aquecimento será projetado para o aço tendo em vista que este tem resistividade elétrica conhecida e aproximadamente constante.

Parte-se agora para a concepção e projeto da bancada de testes.

3.2 CONCEPÇÃO DA BANCADA DE TESTES DE EMISSIVIDADE

A concepção da bancada está nos moldes da norma japonesa. Foi idealizada uma câmara de vácuo dentro da qual as barras cilíndricas seriam posicionadas. Um sistema elétrico de aquecimento seria ligado às extremidades da barra. O método utilizado será o método A da norma americana, com algumas modificações. Dois sensores infravermelhos devem ser especificados. Um modo de transformar uma parte da barra em uma aproximação de corpo negro deve ser escolhido. Todas as funções de aquisição de dados e análise dos dados devem ser definidas.

Antes de partir para o projeto é necessário discutir as possíveis fontes de erro, as alternativas existentes para a construção da bancada, quais os requisitos que devem ser atendidos pelo aparato construído e quais alternativas seriam viáveis ou inviáveis para a solução de problemas.

O primeiro ponto a se discutir é a questão da necessidade do vácuo. O vácuo tem por função eliminar as trocas de calor por condução e convecção e eliminar o ar (meio semi-transparente) entre a superfície da amostra e o sistema óptico do sensor infravermelho. O ponto negativo é que a pressão

dentro da câmara pode levar os componentes à fadiga ou a uma alteração de posição dos componentes dentro da câmara.

Ambos fatos negativos podem ser contornados, ao passo que os fatos positivos são de suma importância. Foi visto na seção 2 que a emissividade de metais é muito pequena, o que significa que o efeito predominante de transferência de calor é a condução ou a convecção. Se não eliminarmos esta possibilidade poderemos ter altos graus de incerteza nas medidas de temperatura e emissividade.

Assim, a construção de uma câmara de vácuo que abrigue o experimento foi definida como necessária.

Outro ponto é a escolha do método A ao invés do método B da norma americana, visto que este parece mais simples.

Um dos principais problemas no método B é fixar o termopar no CP. Devido à pequena e curva área superficial que acomete as laterais dos CPs, a fixação do termopar torna-se trabalhosa. Além disso, o método de aquecimento escolhido foi o de corrente elétrica. Trabalhos como o de Ma [5] foram enfáticos em enumerar a quantidade enorme de possíveis erros de leitura do termopar quando este é afixado num corpo pelo qual circula corrente. Visto que o termopar funciona por efeito Seebeck, ele é um dispositivo termoeletrônico, isto é, sofre influência de campos e correntes elétricas. Uma corrente circulando pelos terminais do termopar pode gerar uma tensão parasita na tensão de Seebeck. Este fato pode ser minimizado pelo uso de corrente alternada, mas é um risco a mais. Já o método da emissividade de referência, método A, não apresenta estes riscos.

Outro ponto de discussão é a necessidade de blindagem radiométrica da câmara de vácuo. A Figura 3.1 pode ajudar nesta análise.

A Figura 3.1 mostra o balanço de energia entre objeto e ambiente. A energia emitida pelo objeto é EB , e pode ser definida como $1-RB$, RB sendo a porção de radiação refletida internamente. Sobre o objeto incide uma irradiância Irr , da qual $IR2$ é refletida pela superfície. Assim, a radiosidade total que deixa a superfície do objeto $G = EB + IR2$. Sendo B a radiação do corpo, isto é, a quantidade de energia térmica que o corpo tem (que por sua vez está diretamente ligada à temperatura do corpo) pode-se estudar o balanço de radiação para três casos:

1) Quando a temperatura ambiente é a mesma do corpo. Neste caso tem-se que I é igual a B e $IR2 = RB$ pois as porções refletidas são as mesmas. Nesse caso $G = (1 - RB) + RB = 1$. O sensor detecta radiação como se provinda de um corpo negro, o que gera inconsistências nas medições. Este é o motivo pelo qual não se consegue medir emissividade à temperatura ambiente.

2) Quando a temperatura do corpo é maior que a ambiente. Neste caso a parcela refletida da irradiação será desprezível quando comparada à radiação emitida pelo corpo, pois $EB \gg IR2$. Assim, $G = EB + IR2 = EB$. Este é o caso ótimo para as medições.

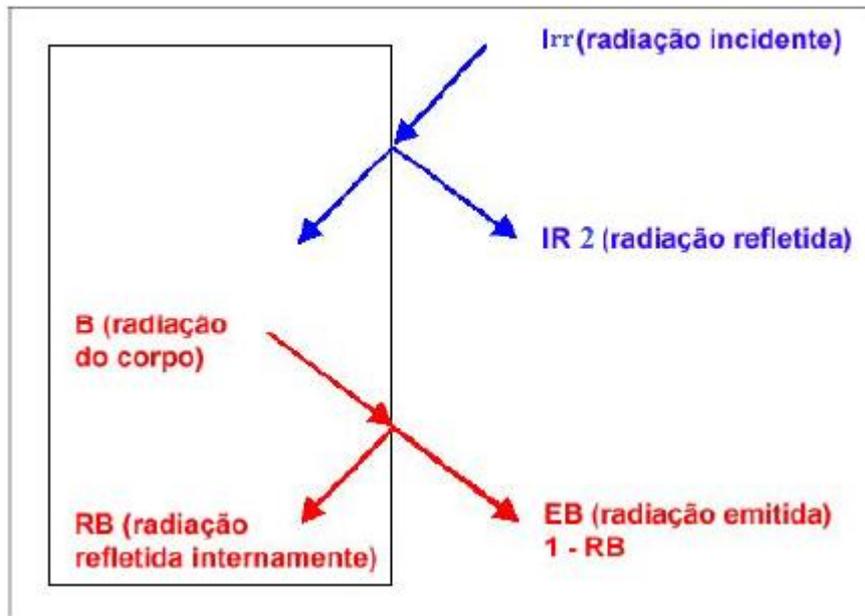


Figura 3.1 – Balanço da energia do objeto e do ambiente [17].

3) Quando o ambiente está mais quente que o objeto. Neste caso $IR2 \gg EB$ e o sensor vai captar praticamente só radiação ambiente. Este é o caso mais difícil de solucionar e em geral envolve ter que modificar a estrutura de medição.

Assim, analisando-se os três casos, e considerando que neste experimento parte-se da temperatura ambiente e aquece-se o objeto até 90°C , estarão presentes ou a situação 1 ou a situação 2. A situação 2 é a favorável para a medição e a situação 1 impede que as medidas sejam realizadas em temperatura ambiente. O uso de um blackout minimiza a existência da componente $IR2$, atenuando todos os problemas que podem decorrer dela. Assim, será utilizado um blackout.

A concepção acima pode ser esquematizada como mostrado nas Figuras de 3.2 a 3.4.

A Figura 3.2 mostra o esquema projetado do sistema de vácuo. A câmara de vácuo é vedada nas laterais com cola e fixada com pregos. Dentro da câmara há braços de acrílico que dão estrutura à câmara e evitam a deflexão das paredes da caixa devido à pressão do ar externo. No fundo da câmara há uma base de acrílico com rasgos na direção do comprimento da caixa. Ela será utilizada para fixar os suportes de alumínio que fixarão os sensores e o CP na posição desejada. Os rasgos permitem 1 grau de liberdade no eixo y para posicionamento.

Os três furos laterais são utilizados da seguinte maneira: no primeiro conecta-se um vacuômetro que será usado para monitorar a pressão no interior da caixa. A conexão de 25mm de diâmetro do flange do vacuômetro será selada com fita veda-rosca para garantir a vedação. O terceiro furo conecta a caixa na bomba de vácuo.

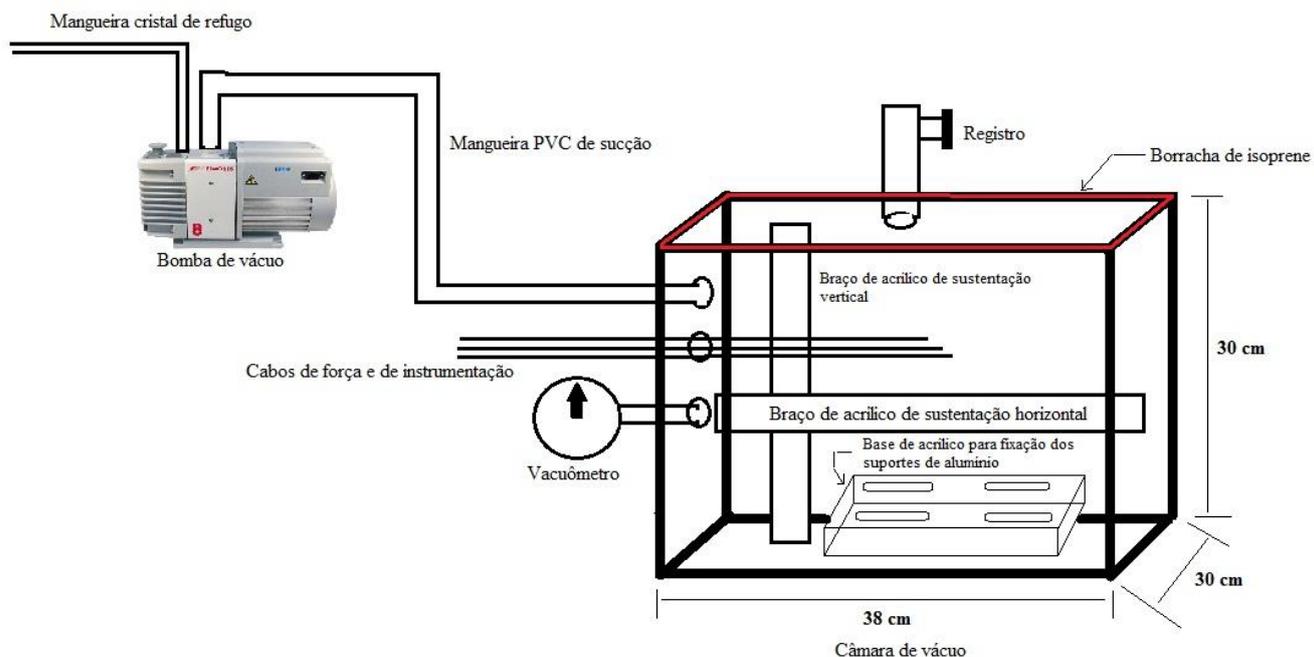


Figura 3.2 – Esquema do sistema de vácuo.

A mangueira de PVC é conectada ao flange de 32mm com uma rosca e uma abraçadeira. A vedação é garantida com fita veda-rosca. O furo do meio será utilizado para a passagem dos cabos de força e de instrumentação dos sensores. Os sensores e CP não estão representados na figura, mas serão explicados mais adiante, aqui vale notar que os cabos de força e as fibras ópticas dos sensores entrarão na caixa por esse furo e se conectarão ao CP e aos elementos sensores dos radiômetros, respectivamente. A outra extremidade destes cabos se conectará ao sistema de aquecimento e aos radiômetros propriamente ditos do lado de fora da caixa. Há um flange de 20mm de diâmetro acoplado nesse furo e, uma vez que todos os cabos estejam posicionados, o furo será vedado com silicone e fita isolante.

A mangueira cristal é usada para o refugo de óleo da bomba e o refugo é ejetado para fora do laboratório. A faixa vermelha no perímetro superior da caixa é o local onde a borracha de isoprene será colada. Todo o perímetro da caixa será revestido com borracha para que esta sirva como vedação para a tampa.

O registro no furo central na tampa é utilizado tanto para induzir o vácuo no início do ensaio quanto para aliviar a pressão interna ao final do ensaio.

A Figura 3.3 mostra o esquema detalhado da montagem que será feita dentro da câmara. A seta de saída indicando “Para o trafo” mostra a conexão entre este esquema e aquele mostrado na Figura 3.3. Os cabos de força tem Ring terminals nas suas extremidades para que seja feita a conexão dos CPs.

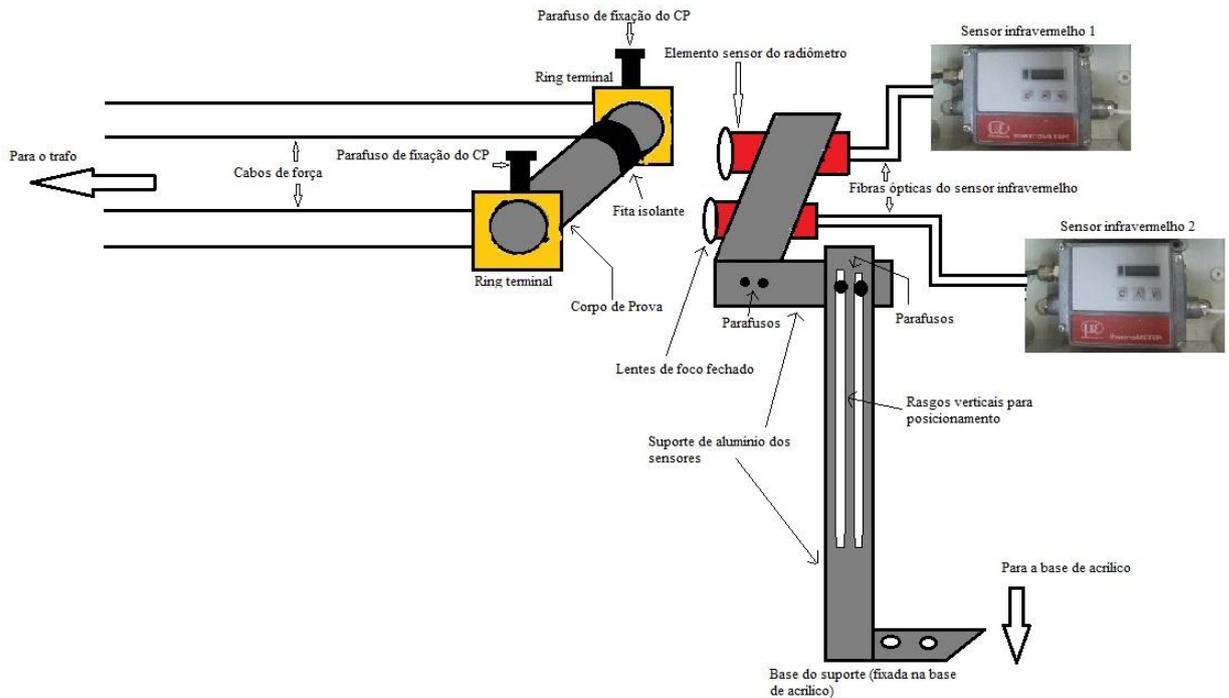


Figura 3.3 – Esquema do suporte dos sensores, corpo de prova e posicionamento destes dentro da câmara de vácuo.

A outra extremidade dos cabos de força vai para fora da câmara de vácuo e direto para o trafo. O CP é representado na Figura 3.3 já com a fita isolante posicionada sobre ele. A fita dará uma volta no perímetro lateral do cilindro. O CP será fixado nos ring terminals pelo ajuste dos parafusos de fixação do CP.

As lentes de foco fechado dos elementos sensores dos radiômetros devem estar a uma distância de 10mm do CP. Além disso, note que um elemento sensor está de frente para a parte com fita do CP enquanto que o outro está de frente para a parte sem fita do CP. Doravante, para efeitos de simplicidade, convencionaremos referimo-nos ao sensor de frente para a fita como Sensor 1 e ao sensor de frente para o corpo do CP sem fita de Sensor 2. Os elementos sensores estão ligados aos radiômetros por cabos de fibra óptica. Importante lembrar que os cabos de fibra óptica também saem pelo furo central e se ligam aos radiômetros na parte externa da caixa.

A seta de saída indicando “Para a base de acrílico” mostra a conexão desta figura com a Figura 3.2. A base do suporte de alumínio será parafusada na base de acrílico mostrada na Figura 3.2. Esta fixação tem 1 grau de liberdade, permitindo que se regule a distância de 10mm entre sensor e CP.

A estrutura de alumínio fixa o elemento sensor do radiômetro dentro da caixa. Diversas conexões presas por parafusos são utilizadas. Na haste vertical do suporte há rasgos. Estes tem a mesma função dos rasgos na base de acrílico, permitir 1 grau de liberdade no posicionamento dos sensores, só que

neste caso o grau de liberdade é no eixo z. Para máxima eficácia da medida, e conforme visto na teoria na seção 2.3, o sensor deve medir a emissividade do CP na direção normal à da superfície. Uma vez que o CP é cilíndrico e de área lateral pequena isto pode ser difícil de ser alcançado. Para superar essa dificuldade foram inseridos dois rasgos na haste vertical. O objetivo é deixar o suporte superior dos sensores sempre fixo por um parafuso. Isto facilita na medição da posição vertical exata que os sensores devem estar para que, uma vez posicionado o sensor, este não mude de posição enquanto o segundo parafuso do segundo rasgo é apertado dando rigidez à estrutura.

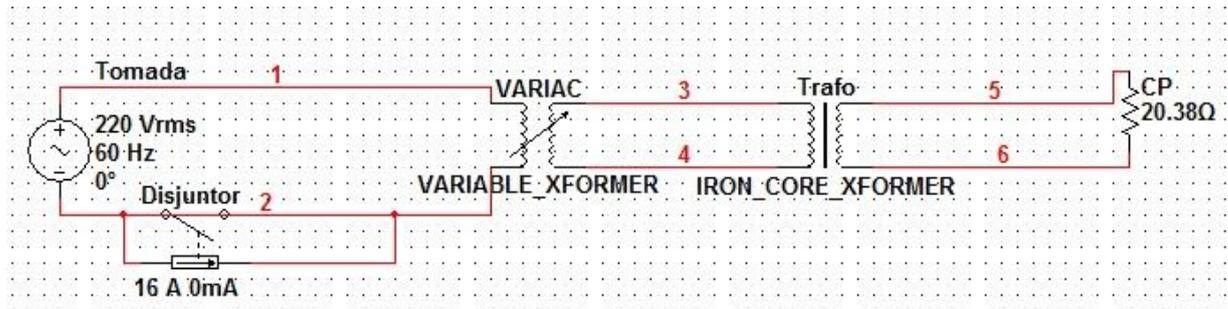


Figura 3.4 – Esquema elétrico do sistema de aquecimento.

A Figura 3.4 mostra o esquema elétrico do sistema de aquecimento. Como dito, o sistema é composto basicamente por um disjuntor, um trafo e um VARIAC. Como mostrado nas Figuras 3.2 e 3.3 o CP é ligado diretamente ao trafo. Por se tratar de uma barra de material metálico o CP pode ser eletricamente modelado como uma impedância puramente resistiva. Assim, na Figura 3.4 o CP é representado por uma resistência. Na figura o valor de 20.38Ω corresponde à resistência aproximada do CP de aço.

A resistência é então ligada a um transformador de 800W de potência ativa e relação de transformação de 220/12V. O trafo é então ligado a um VARIAC de 1,5kVA de potência aparente e relação de transformação de 220/0~240V. O VARIAC é um transformador que tem a relação de transformação variável, isto é, a tensão no secundário do VARIAC pode ser ajustado manualmente. Vale ressaltar que o dispositivo de ajuste do VARIAC é analógico. O VARIAC é então ligado a um disjuntor de proteção de 16A, que abre o circuito caso a corrente exceda esse valor. O sistema então é ligado na rede elétrica pública que fornece tensão AC de 220V rms (*root mean square*) cujo sinal senoidal tem frequência de 60Hz.

Pode-se agora versar sobre o projeto da bancada.

3.3 PROJETO DA BANCADA DE TESTES DE EMISSIVIDADE

A Tabela 3.1 mostra um quadro com os passos seguidos para o projeto da bancada. A primeira coluna é o número de referência. A segunda coluna define o que se pretendia projetar naquele passo. A terceira coluna indica os motivos ou requisitos experimentais daquele passo e a quarta coluna mostra a solução escolhida. Discorreremos sobre cada item projetado.

1) Primeiro projetam-se as dimensões das barras cilíndricas para que se aproximem de tamanhos e formas utilizados em aplicações reais. Assim, a forma escolhida foi a forma cilíndrica de 100mm de comprimento por 10mm de diâmetro.

Número	Descrição	Requisitos que satisfaz	Alternativa escolhida
1	Definir a dimensão e forma dos CPs	Delimita o tipo de CP que pode ser avaliado na bancada e prescreve as condições para a escolha do sistema de aquecimento e do sistema de medição IR.	Barras cilíndricas com comprimento L = 100mm e Diâmetro D = 10mm
2	Definir a forma como se alterará a superfície de uma parte do CP para que apresente emissividade conhecida	Atende ao requisito do método A da norma ASTM que exige uma modificação da superfície da amostra para que esta apresente uma porção superficial com emissividade conhecida	Fita Isolante com valor de emissividade de 0,95
3	Definir um meio de minimizar a quantidade de radiação irradiada ao CP	Corrigir os erros devido a irradiação. Esta altera a temperatura da superfície do CP como consequência da parte da irradiação absorvida pelo corpo e a parte de irradiação refletida pelo corpo soma-se à radiação emitida pelo corpo e gera um erro de leitura por parte do sensor IR	Tecido escuro courino de 2m ² de área usado na parte externa da câmara de vácuo, para cobrir todo o aparato.
4	Definir o material com o qual será confeccionada a câmara de vácuo	Deve ser um material resistente à pressão que será exercida pelo ar na parede externa da câmara e deve ter propriedades ópticas que auxiliem no experimento	A câmara será feita de acrílico de espessura 10mm

5	Definir as dimensões e forma da câmara de vácuo	Deve ser dimensionada de modo que comporte o CP, cabos de instrumentação e do sistema de aquecimento e as estruturas de suporte do CP e dos sensores	A câmara será em forma de um paralelepípedo de dimensões 30x30x38 cm
6	Definir as formas de vedação da câmara e como será feita a comunicação entre os sistemas externos a câmara com os sensores IR e o CP	Para se induzir vácuo em um recipiente em laboratório é necessário que o recipiente seja hermeticamente fechado. Além disso, é necessário que haja comunicação entre os sistemas de aquecimento e aquisição de dados com o CP e os sensores no interior da caixa	A caixa foi confeccionada como uma peça única entre fundo e duas laterais. As outras laterais foram coladas e parafusadas na caixa. A tampa é a via de acesso ao sistema do interior da caixa. Borracha de geladeira foi utilizada na borda superior da caixa a fim de reproduzir a vedação encontrada em geladeiras, nas quais a própria sucção no interior da caixa veda a tampa. Para o acesso externo três furos de 30mm de diâmetro foram feitos em uma das laterais e um furo de 5mm de diâmetro na tampa
7	Definir os suportes e estruturas internas da caixa de vácuo	O CP e os sensores IR devem estar alinhados para que se possa fazer a medição. Para tanto é necessário um suporte para sustentação e posicionamento destes no interior da caixa	Suportes feitos de alumínio com 3 graus de liberdade serão confeccionados para que se possa posicionar CP e sensores dentro da caixa. Além disso, 2 barras de acrílico de 1x10x30cm são usadas para dar sustentação extra à caixa na direção vertical e um cilindro de tecnil de 30cm de comprimento e 15mm de diâmetro é usado para dar suporte em uma das direções horizontais da caixa
8	Definir a bomba que será utilizada para induzir vácuo na câmara	Bomba de sucção para induzir vácuo no recipiente no qual será realizado o experimento	Bomba Edwards RV8 115/230V

9	Definir os tubos e canos necessários para a operação da bomba	Necessário para a operação da bomba	Para a sucção será usada uma mangueira PVC flexível e transparente de 2m de comprimento e diâmetro nominal de 32mm. Para a descarga da bomba será usada uma mangueira cristal trançada de 5m de comprimento e diâmetro de 12,7 mm.
10	Definir um vacuômetro	É necessário medir e monitorar a pressão dentro da câmara de vácuo durante o ensaio	O vacuômetro usado é de 760mmHg NPT de 6.35 mm de diâmetro
11	Definir o sensor infravermelho a ser utilizado	Sensor será utilizado para medir a temperatura do CP pelos métodos semi-invasivo e não-invasivo. Com isso teremos uma estimativa da emissividade do CP	Sensores infravermelhos de banda espectral microepsilon CT-SF22 em que o cabo de transmissão de dados do elemento sensor ao processador do termômetro é de fibra óptica
12	Definir o sistema de potência elétrica responsável por aquecer o CP	O aquecimento por efeito Joule será feito por meio da conexão do CP a um sistema de potência	Por se tratar de um sistema predominantemente resistivo optou-se por uma ligação conjunta entre um VARIAC de 1,5 kVA 220/0~240V e um transformador de 800W 220/12V
13	Definir os periféricos do sistema de aquecimento	O sistema de aquecimento precisa de proteção elétrica, cabos e conectores para montagem do circuito	O VARIAC foi ligado a um disjuntor de proteção de 16A. Cabos de força de cobre com blindagem e 8mm de espessura foram designados para ligar o trafo no CP. A barra foi fixada com Ring terminals de 35mm ² de área
14	Definir o sistema de aquisição e análise de dados	Os valores de temperatura lidos pelos sensores devem ser salvos em arquivo digital para que posteriormente possa-se analisar os dados coletados	Software proprietário Compact Connct da micro-epsilon e MatLab.

Tabela 3.1 – Plano do projeto da bancada.



Figura 3.5 – CPs preparados com fita isolante agindo como material de emissividade de referência.

2) O segundo passo é escolher o material que servirá como emissividade de referência, uma vez que optamos pelo método A da norma ASTM. A fita isolante tem emissividade conhecida de 0,95 e pode ser facilmente inserida e retirada do perímetro dos CPs. A Figura 3.5 mostra as barras preparadas com as fitas.

3) Em seguida deve-se definir o modo de bloqueio de irradiância no experimento. Um tecido escuro de courino de tamanho suficiente para encobrir a caixa é a melhor aproximação de um corpo completamente opaco que se pôde obter. Definiu-se 2m² de área para o tecido de courino.

4) A seguir deve-se definir as estruturas necessárias para a câmara de vácuo. Primeiro escolheu-se o material de confecção da caixa como sendo acrílico de 10mm de espessura. A pressão de ruptura por compressão do acrílico é de aproximadamente 75 bar. Logo a caixa é resistente o suficiente para não ceder à pressão do vácuo que será induzido no interior da caixa. Além disso, as propriedades ópticas do acrílico são favoráveis ao experimento. Por ser um material termoplástico ele é um razoável isolante térmico, de modo favorecer para que o sistema dentro da caixa se comporte como um sistema isolado. Outra propriedade útil é o fato de ser um meio semi-transparente. A radiação emitida pelo CP terá apenas uma desprezível parcela refletida pelas paredes da caixa, de modo diminuir a quantidade de irradiação incidente sobre o CP. A maior parte da radiação será transmitida pelo acrílico para o courino, que absorverá a energia.

5) O sistema a ser montado dentro da câmara consiste: do CP ligado ao sistema de aquecimento e posicionado de forma rígida dentro da caixa; dos sensores IR a serem posicionados na direção normal ao CP e cabos para transferência dos dados coletados, bem como de um suporte rígido que mantenha os sensores na posição desejada. Assim, definiu-se a câmara como um paralelepípedo de dimensões externas de 30x30x38 cm.

6) A caixa deve ser contínua entre duas laterais e a parte inferior, as demais laterais devem ser coladas e parafusadas a fim de aproximar-se de um recipiente hermeticamente fechado. Três furos de

30 mm de diâmetro serão feitos em uma das laterais: um para o vacuômetro, instrumento que vai medir e permitir monitorar a pressão de vácuo no interior da caixa; um para o cabo de sucção que será ligado à bomba de vácuo e um para os cabos de instrumentação e aquecimento. Os furos laterais terão flanges para fazer a conexão entre os componentes externos e internos da caixa. Eventuais pontos nos furos que estiverem permitindo a entrada de ar serão vedados utilizando-se fita veda-rosca e silicone. O furo feito na tampa da caixa é de 5mm de diâmetro. Será utilizado como um registro para induzir o vácuo lentamente no início do ensaio e para alívio da pressão ao final do ensaio. Isto será feito pela alocação de um flange, um tubo e um registro no furo.

As bordas superiores da caixa onde a tampa vai se conectar serão preenchidas em seu perímetro com borracha a base de isoprene. O objetivo é reproduzir a vedação da geladeira comum, em que a própria pressão de sucção da bomba de vácuo se encarregará de vedar a tampa da caixa. Fita veda-rosca será utilizada nos vértices da caixa para reforçar a vedação.

7) Suportes feitos de alumínio com 2 graus de liberdade serão confeccionados para que se possa posicionar CP e sensores dentro da caixa. O suporte do sensor permitirá movimentá-lo até que este esteja na posição adequada de medição. O suporte do CP só irá mantê-lo fixo numa determinada localização. Além disso, 2 barras de acrílico de 1x10x30cm são usadas para dar sustentação extra à caixa na direção vertical, uma barra de acrílico de 1x10x38 cm é usada para dar sustentação na direção de duas das laterais e um cilindro de tecnil de 30cm de comprimento e 15mm de diâmetro é usado para dar suporte na outra das direções horizontais da caixa. Estas peças são usadas como braços dentro da caixa para evitar a deflexão das paredes da caixa devido à pressão externa. A estrutura de alumínio será parafusada na placa de acrílico que se encontra no interior da caixa.

8) Não é necessário uma pressão de vácuo propriamente elevada, necessita-se apenas garantir que os fenômenos de condução e convecção cessem. Assim, utilizou-se uma bomba de vácuo Edwards RV8 cuja pressão máxima nominal é de 2 bar. Contudo, para evitar deflexão por compressão da caixa e por não ser necessário uma pressão de vácuo tão elevada utilizou-se uma pressão de aproximadamente 220mmHg ~0.293 bar no experimento.

9) A bomba de vácuo precisa de mangueiras flexíveis para que a estrutura câmara-bomba possa ser transportada. Para a sucção será usada uma mangueira PVC flexível e transparente de 2m de comprimento e diâmetro nominal de 32mm. Essa mangueira será presa com uma abraçadeira em um dos flanges posicionados na caixa. Para a descarga da bomba será usada uma mangueira cristal trançada de 5m de comprimento e diâmetro de 12,7 mm.

10) O vacuômetro usado é de 760mmHg NPT de 6.35 mm de diâmetro. Como a pressão de operação será de 220mmHg a margem de segurança até 760mmHg é suficiente. O vacuômetro será preso por rosca a um dos flanges posicionados na caixa.

11) Agora será definido qual sensor de infravermelho será utilizado. Nossa faixa de interesse de temperatura é de 293,15 K até 363,15 K. Ao analisarmos a Figura 2.14, observamos que são temperaturas nas quais a radiação emitida pelo objeto encontra-se na porção infravermelha do espectro apenas. Modela-se os sensores em torno dos pontos de $\lambda_{m\acute{a}x}$, comprimento de onda em que há o pico de emissão de radiação térmica. Pela Equação 2.7 tem-se que (Equação 3.1):

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{2898}{T} \quad (3.1)$$

Resolvendo a Equação 3.1 para $T = 293,15$ e para $T = 363,15$ obtém-se (Equação 3.2):

$$\begin{aligned} \lambda_{m\acute{a}x1} &= 9,885\mu m \\ \lambda_{m\acute{a}x2} &= 7,980\mu m \end{aligned} \quad (3.2)$$

É preciso agora escolher sensores que meçam preferencialmente radiações da banda infravermelha do espectro devido às relativas baixas temperaturas empregadas neste trabalho e que comportem os comprimentos de onda descritos pela Equação 3.2. Outro parâmetro a ser considerado é que o elemento sensor do termômetro infravermelho deverá estar dentro da câmara de vácuo e deverá transferir os dados lidos para o sistema de aquisição do lado de fora da câmara. Assim, é necessário um radiômetro que possua um elemento sensor remoto e que a transferência dos dados seja robusta.

Considerando a disponibilidade comercial de sensores infravermelhos o sensor escolhido foi o sensor Micro-epsilon CT – SF22 que opera na banda espectral de 8-14 μ m e cujo elemento sensor é ligado ao processador do termômetro por fibra óptica. A fibra óptica é uma perfeita blindagem eletromagnética.

12) Para definir o sistema de aquecimento será tomado por base o CP de aço. O aquecimento é por efeito Joule, assim, é necessário dimensionar um sistema de potência que entregue energia elétrica suficiente para o aquecimento da barra de aço. Primeiro notemos que a temperatura do CP deve ser variada continuamente e lentamente ao longo do tempo para a realização do experimento. Significa dizer que o sistema deve ser capaz de elevar a temperatura do CP para vários pontos distintos de temperaturas. Precisa-se, então, de um sistema em que a corrente possa ser controlada de modo que possa ser aumentada em incrementos discretos até uma corrente máxima que corresponderá à máxima temperatura atingida pelo CP. Utilizando-se a Equação 2.26 para encontrar a corrente máxima que deverá ser fornecida ao CP.

Substituindo na Equação 2.26 os valores de $D = 10\text{mm} = 0,01\text{m}$, $T = 363,15\text{K}$, $T_{\text{sur}} = 293,15\text{K}$, $Re' = 1,6 \Omega/\text{m}$, $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4 = 0.16[22]$ obtém-se (Equação 3.3):

$$I = 1,33\text{A} \quad (3.3)$$

Essa é a corrente com a qual o CP de aço atinge a temperatura de 90°C, a máxima temperatura deste experimento. Contudo, como dito, é necessário um meio de variar a corrente que circula pelo CP de 0 a 1,33A. Além disso, para aplicações de engenharia, 1,33A é uma corrente alta. A Equação 2.28 nos diz que a potência cresce com o quadrado da corrente, então espera-se que o sistema seja de alta potência.

Quando se fala em alta potência e alta corrente para um circuito predominantemente resistivo (a barra de aço pode ser modelada com uma resistência) o componente elétrico tipicamente utilizado é o transformador. Entretanto, não é possível ligar o transformador à barra e diretamente na tomada, pois a barra funcionaria como um curto-circuito. Para contornar esse problema é preciso utilizar um componente elétrico que funcione como um buffer, isolando eletricamente o circuito transformador-barra. Isso geralmente é feito também com transformadores. Entretanto, transformadores possuem relações de tensão e corrente na sua entrada e saída constantes. Um trafo não é capaz de variar a corrente. Para solucionar estes dois problemas será utilizado um VARIAC. Um VARIAC é um dispositivo elétrico tipo um transformador que isola eletricamente dois circuitos e possui uma saída variável. A entrada do VARIAC é especificada e constante. Contudo, um potenciômetro permite ajustar a saída de tensão do VARIAC. Se alterarmos a tensão fornecida na entrada do trafo, a tensão e corrente da saída também irão variar. Para um trafo valem as seguintes relações de transformação (Equações 3.4 e 3.5):

$$\frac{V_1}{V_2} = a \quad (3.4)$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{1}{a} \quad (3.5)$$

onde 'a' é a relação de espiras do trafo ou relação de transformação do trafo. Note que quanto maior a relação de espiras menor é a tensão e maior é a corrente no secundário do trafo. Por questões de segurança sempre é desejável trabalhar com baixas tensões. Nesta aplicação precisa-se de altas correntes, então quanto maior a relação de espiras, maior será a corrente no CP. Isto nos leva a procurar o trafo comercial com a maior relação de espiras e que suporte correntes de 1,33A e alta potência. O trafo escolhido é um de 220/12V e 800W. O VARIAC segue as mesmas especificações do trafo e comercialmente foi escolhido um VARIAC de 220/0~240V e 1,5kVA.

13) Os periféricos do sistema de aquecimento foram projetados da seguinte forma: o VARIAC foi ligado a um disjuntor de proteção de 16A e este foi ligado na tomada. O trafo foi ligado na saída do VARIAC por cabos de cobre. Cabos de força de cobre com blindagem e 8mm de espessura foram designados para ligar o trafo no CP. A barra foi fixada com Ring terminals de 35mm² de área. Os CPs são trocados desparafusando-se os ring terminals.

14) A aquisição dos dados lidos pelos sensores IR será feita pelo software proprietário Compact Connect da micro-epsilon. Aqui vale notar que o software não permite alteração da emissividade ajustada enquanto em operação. Os únicos dados salvos pelo software e disponibilizados ao usuário são o tempo e os valores de temperatura. Estes dados, juntamente com os valores de emissividade que serão adquiridos no ensaio serão então processados no software MatLab. Este também será utilizado para traçar as curvas emissividade x temperatura.

Com isso a bancada está projetada. Com base no projeto acima descrito fez-se a listagem detalhada dos materiais a serem utilizados na construção da bancada. Esta listagem está mostrada na seção 3.4.

3.4 MATERIAIS UTILIZADOS

Para a construção de todo o aparato e realização dos procedimentos experimentais, foram utilizados os seguintes itens no decorrer deste trabalho:

1) Para o sistema de vácuo:

- Caixa de acrílico de espessura 10mm e dimensões 30x30x38 cm;
- 01 Vacuômetro Ind Bras 760mmHg NPT 1/4";
- 01 Bomba de sucção Edwards RV8 115/230V;
- 04 adaptadores Tigre tipo flange DN 32 mm x 1" (para conexão da BBA), 20 mm x 1/2" (para conexão do vacuômetro), 25 mm x 3/4" (para passagem de cabos de alimentação e sinais), 20 mm x 1/2" (para conexão do registro soldável de PVC);
- 02 abraçadeiras de 25~38mm;
- 02 metros de mangueira PVC flexível e transparente, diâmetro nominal de 32mm;
- 05 metros de mangueira cristal trançada de 1/2";
- 2m² de tecido escuro courino;
- 02 terminais de anel 35mm²;
- 02 terminais forjados 35mm²;
- 01 cinta seladora de roscas 18x50 mm;
- 01 adesivo plástico para PVC, peso líquido 175g;
- 01 bisnaga vedante de silicone, peso líquido 280g;
- 2m de borracha de vedação a base de isoprene;
- 03 barras de acrílico e 01 cilindro de tecnil de dimensões 10x30cm e 10x38cm, respectivamente;
- Isopor;

- Suportes de alumínio;
- Parafusos, porcas, arroelas e borboletas.

2) Para o sistema de aquecimento:

- Um VARIAC 1,5kVA 220/0~240V;
- Um transformador de 220/12 V e 800VA;
- Um cooler de computador ETRI 12V;
- Fonte de alimentação DC regulada Minipa MPL 3303;
- 02m de cabos de força de cobre blindados de 8mm de espessura;
- 02 Ring terminal de 35 mm²;
- 02 terminais forjados de 35mm;
- Multímetro digital Minipa ET-2082C;
- 01 Disjuntor de proteção de 16A;
- 01 Filtro de linha;

3) Materiais necessários para a realização dos ensaios e para o sistema de aquisição de dados:

- Fita isolante de emissividade 0.95;
- Sensores infravermelho MicroEpsilon CT-SF22;
- Barra cilíndrica de aço polido de comprimento 100mm e diâmetro 10mm;
- Barra cilíndrica de NiTi LM 0299 , Níquel 55% e Titânio 45%. Comprimento 100mm e diâmetro 10mm;
- Software proprietário Compact Connect da micro-epsilon;
- Microsoft Excel 2007;
- MatLab R2008A;
- Notebook HP pavillon dv6, processador Intel i5, 6 GB de RAM, Windows 7.

Estes são os materiais necessários para a construção da bancada de medição de emissividade, para a correta execução do procedimento de levantamento da curva emissividade x temperatura e para a aquisição e análise dos dados coletados. Inicia-se a fase de construção da bancada e definição dos procedimentos experimentais.

4 CONSTRUÇÃO DA BANCADA

Este capítulo tem por objetivo apresentar o procedimento de construção da bancada.

4.1 CONSTRUÇÃO DO APARATO

A caixa utilizada como câmara de vácuo foi dimensionada e adquirida sob encomenda na empresa Acrílico Arte Criações em Acrílico Ltda. A Figura 4.1 mostra a câmara de vácuo.

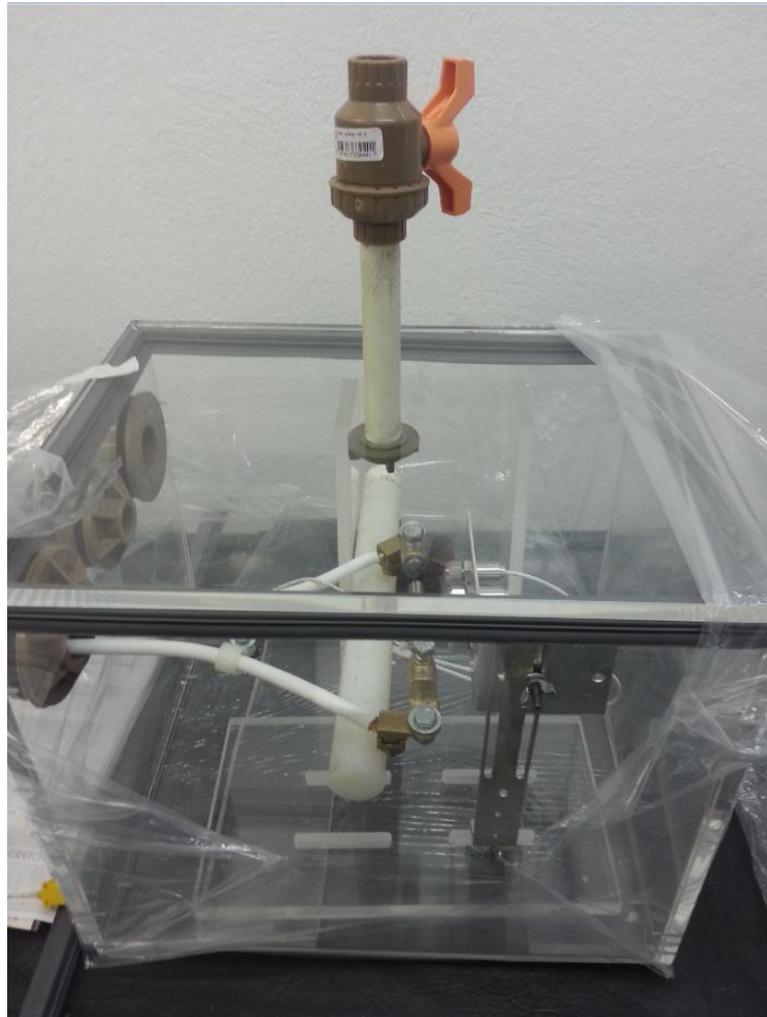


Figura 4.1 – câmara de vácuo.

Na Figura 4.1 a câmara já está com os flanges, registro, vacuômetro, mangueira PVC, base de acrílico, suportes de alumínio, elementos sensores dos radiômetros, cabos de força e CP posicionados. Além disso a borracha de isoprene já foi colada no perímetro da borda superior da caixa. Os flanges marca Tigre, registro, cano de PVC de 5mm de diâmetro e as mangueira de PVC foram adquiridos na loja de construção Só Reparos. A mangueira para refugio já estava disponível no Laboratório de

Materiais Inteligentes da UnB quando do início deste trabalho. A Figura 4.2 mostra uma vista superior da caixa. Importante observar que o vacuômetro e cabos não estão instalados em suas posições definitivas.

A Figura 4.3 mostra a bomba de sucção Edwards RV8. A mangueira de PVC para sucção e mangueira cristal para o refugo de óleo já estão instaladas. A bomba opera com níveis mínimo e máximo de óleo de 0,35 lts e 0,75 lts, respectivamente. Os cabos brancos vistos em cima da bomba na Figura 4.3 são os cabos de força que ligam o trafo ao CP.

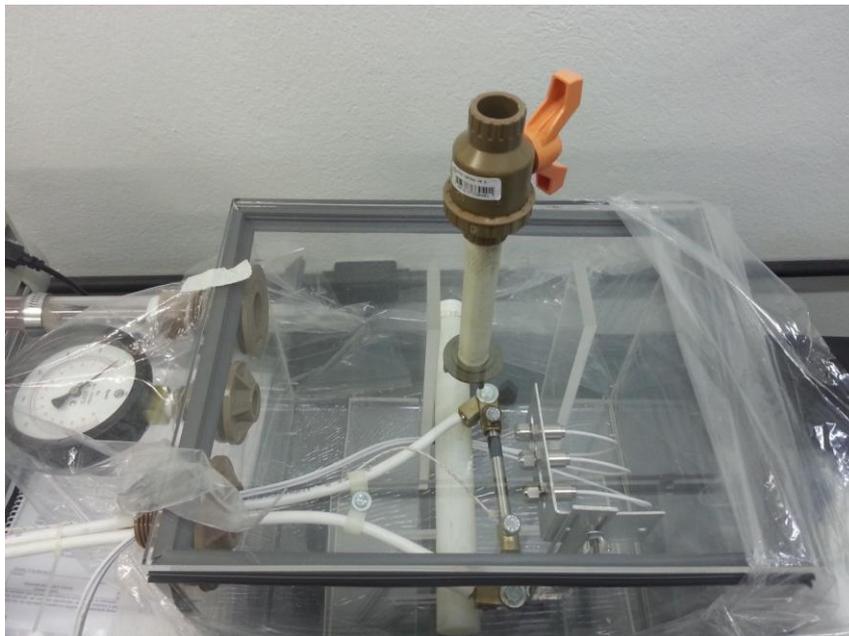


Figura 4.2 – Vista superior da câmara de vácuo.



Figura 4.3 – Bomba de vácuo Edwards RV8.

A bomba de vácuo já estava disponível no laboratório de Materiais Inteligentes da UnB quando do início deste projeto. A Figura 4.4 mostra os sensores infravermelhos da micro-epsilon. Foram adquiridos 3 (três) sensores de temperatura a base de radiação infravermelha marca micro-epsilon da sua revendedora no Brasil, a empresa Contemp, com sede em São Paulo. O software Compact Connect também foi adquirido na empresa Contemp. A alimentação dos sensores é feita via conexão USB com o computador.



Figura 4.4 – Termômetros IR.

A bomba foi ligada à câmara pela mangueira PVC por meio do flange de 32mm. O vacuômetro foi ligado diretamente na caixa pelo flange de 20mm e o flange de 25mm foi utilizado para passar as fibras ópticas dos sensores infravermelhos e os cabos de força do sistema de aquecimento. Este último flange foi depois selado com silicone e fita isolante. A Figura 4.5 mostra o detalhe do suporte de alumínio dos elementos sensores dos radiômetros. O isopor é utilizado para evitar o contato direto entre os vértices dos braços de acrílico e as paredes da caixa de acrílico, como calço e como isolante térmico.

A Figura 4.6 apresenta a base de acrílico que foi posicionada no fundo da caixa e que será utilizada como base de fixação dos suportes de alumínio. Os rasgos foram dimensionados de modo permitirem uma faixa de 10cm de comprimento para ajuste da posição dos sensores.

A Figura 4.7 mostra os componentes do sistema de aquecimento. As conexões elétricas do VARIAC ao trafo foram feitas de modo que o VARIAC atue como um buffer para o circuito elétrico. O disjuntor é ligado na tomada e no VARIAC, o VARIAC é ligado ao trafo e o trafo é ligado ao CP. O trafo foi adquirido na loja Elétrica Dinâmica e o VARIAC já pertencia ao patrimônio da UnB desde o início deste trabalho. A fonte de alimentação minipa mostrada na Figura 4.9 foi utilizada para alimentar o cooler de computador 12V que foi colocado sobre o trafo. Este item não foi inicialmente projetado, mas foi incluído após o teste da bancada devido ao superaquecimento do trafo quando submetido às altas correntes necessárias para os ensaios.

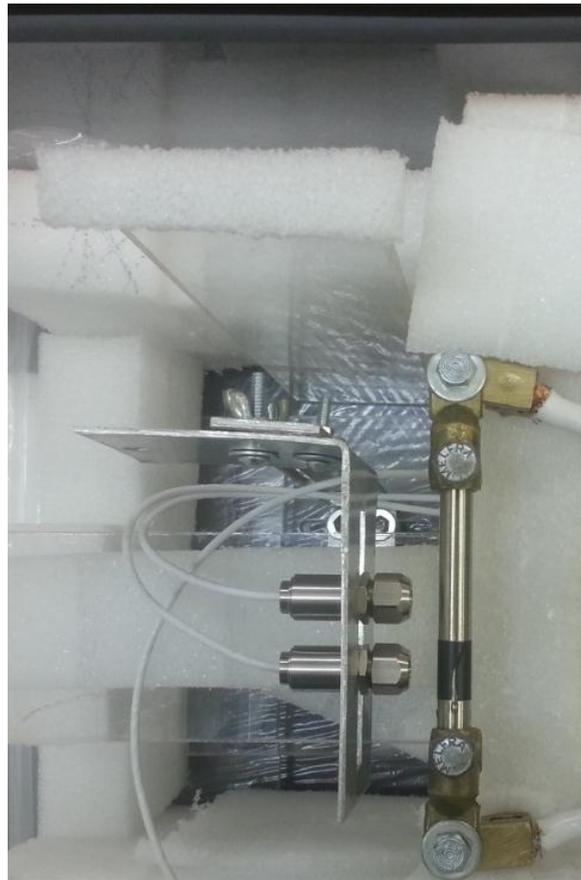


Figura 4.5 – Suporte dos sensores infravermelhos.



Figura 4.6 – Base de acrílico.

Também é possível ver o cooler fixado sobre o trafo na Figura 4.7. A fonte já era propriedade da UnB quando do início deste trabalho.

A Figura 4.8 mostra o disjuntor utilizado. É um disjuntor que desarma quando a corrente excede os 16A. A Figura 4.10 mostra o detalhe do vacuômetro utilizado. O fundo de escala do vacuômetro é de 760mmHg. Embora esse valor seja inferior à pressão de vácuo máxima que a bomba pode induzir, que é de 2 bar ~ 1500mmHg, a pressão de operação deste trabalho será de 220mmHg, de modo que o vacuômetro é suficiente para atender aos requisitos metodológicos. O registro de alívio de pressão será aberto caso se constate aumento involuntário da pressão acima dos 230 mmHg.



Figura 4.7 – Sistema de aquecimento.



Figura 4.8 – Disjuntor.



Figura 4.9 – Fonte de alimentação Minipa.



Figura 4.10 – Vacuômetro.

A Figura 4.11 mostra o computador utilizado com o software Compact Connect. O software vem acompanhado de um manual de instruções digital. Este é o sistema de aquisição de dados. As leituras de temperatura em função do tempo lidas pelos radiômetros são enviadas ao software via conexão USB e este monitora a temperatura em tempo real. Algumas considerações podem ser feitas sobre o software:

- Instalação requer drivers atualizados dos sensores a serem obtidos na internet no site da micro-epsilon;
- Interface simples e amigável com opção de língua em Português;
- Funções disponíveis para gravação, monitoramento e utilização dependem do sensor infravermelho ao qual o software está conectado;
- Cada instância do software só monitora um sensor infravermelho, desta maneira, no caso deste trabalho sempre duas instâncias eram rodadas. Consequência disso é que mais memória RAM do computador é utilizada;
- Oferece diversas opções de configuração, desde intervalo de aquisição, tempo de duração do ensaio, número máximo de dados a serem coletados, ajuste de emissividade e transmissividade do sensor até a possibilidade de ajustar até dois alarmes. Estes alarmes avisam na tela do software e mudam o visor do sensor de cor quando uma dada temperatura é atingida. Neste trabalho foi ajustado um alarme para 30°C e outro para 100°C;
- Uma vez iniciado o modo de coleta e gravação de dados não é mais possível alterar nenhuma configuração, nem o valor da emissividade ajustada no sensor. O ajuste da emissividade só é possível de modo manual no botão analógico do radiômetro.

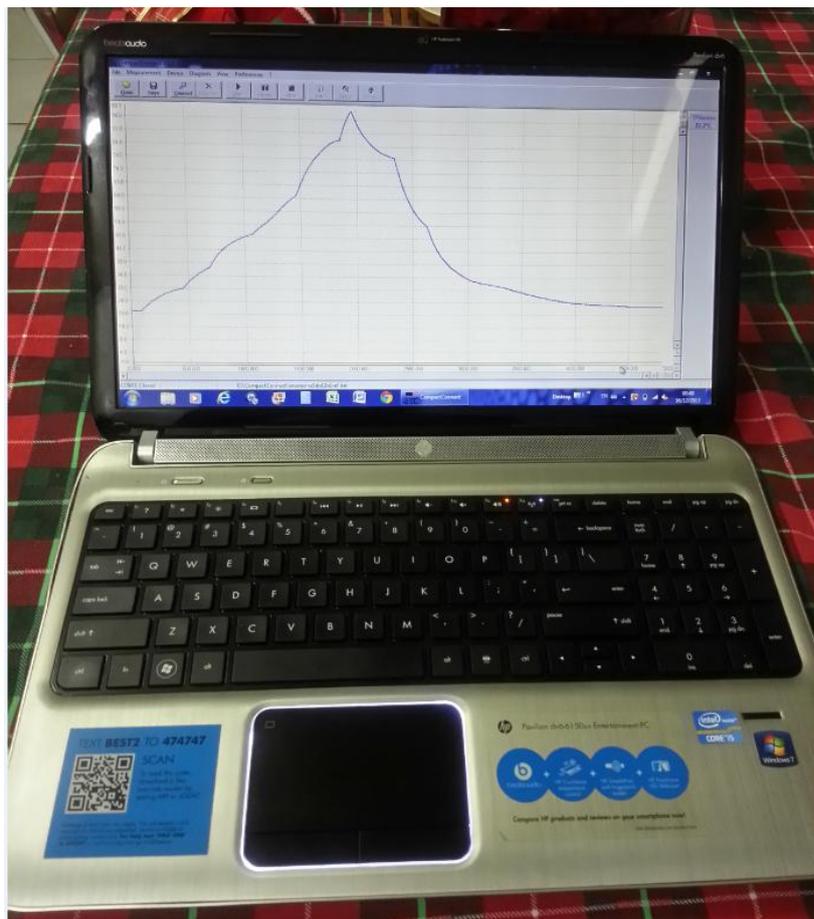


Figura 4.11 – Notebook HP dv6 e *software* Compact Connect.

A Figura 4.12 mostra o tecido escuro tipo courino utilizado como blackout para a câmara de vácuo.



Figura 4.12 – Tecido escuro tipo courino.

Foram adquiridos 2m² de tecido tipo courino. Com isto finaliza-se a construção da bancada. As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam as visões lateral e superior da bancada concluída.

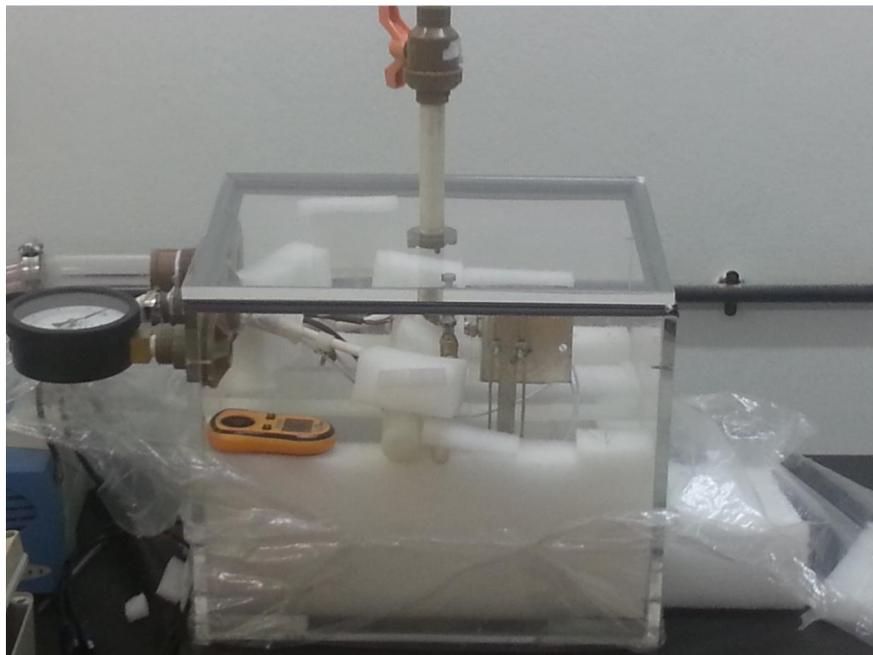


Figura 4.13 – Vista lateral da bancada concluída.

Com o aparato experimental construído podemos definir qual o procedimento específico que foi utilizado para levantar as curvas emissividade x temperatura dos CPs de aço e NiTi.

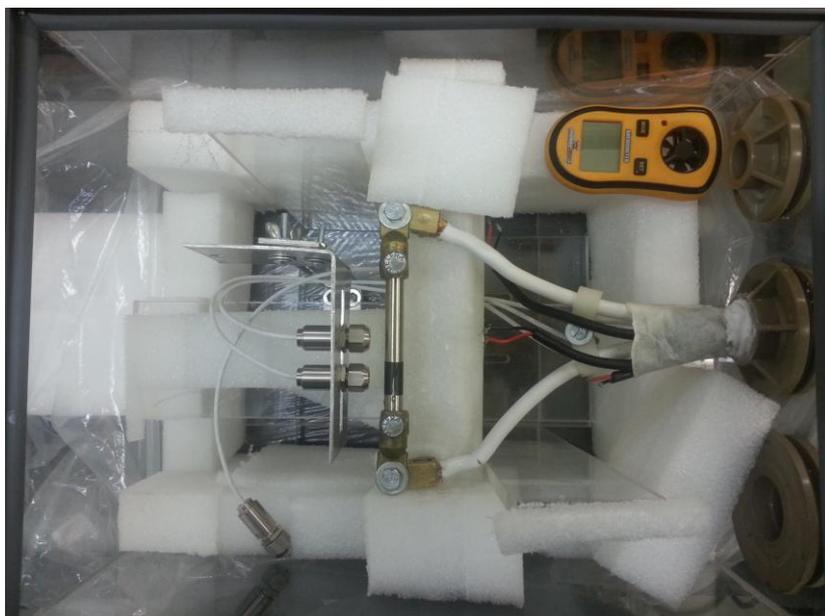


Figura 4.14 – Vista superior da bancada concluída.

4.2 DEFINIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O procedimento utilizado neste trabalho baseia-se no Método A da norma ASTM anteriormente mencionada. Contudo, algumas importantes modificações e particularidades devem ser tratadas. Dois procedimentos serão descritos, um para o ensaio do CP de aço e outro para o ensaio do CP de NiTi.

Procedimento 1:

Este é o procedimento que deve ser adotado para qualquer material metálico comum quando se desejar um estudo da variação da emissividade do material em função da temperatura.

1) Verifique se o CP do aço atende às condições dimensionais especificadas, isto é, se sua forma é cilíndrica de dimensões 100mm de comprimento e 10mm de diâmetro.

2) Em uma das extremidades do cilindro coloque uma camada de fita isolante de emissividade 0.95.

3) Com a bomba de vácuo desligada, tire a tampa da câmara de vácuo e acople o CP nos *ring terminals* e parafuse para garantir a fixação.

4) Ajuste a posição do CP de modo que fique paralelo ao fundo da caixa e perpendicular às laterais da caixa.

5) Posicione um sensor infravermelho na direção da parte do CP coberta pela fita e o outro sensor na direção da parte do CP sem a fita. Ajuste a emissividade do primeiro sensor para 0,95 e do segundo para um valor arbitrário. Neste trabalho o valor arbitrário inicial era 0,4.

6) O sensor infravermelho possui uma lente de foco fechado cuja distância focal é de 10mm, assim, a distância ideal de medição é de 10mm entre o CP e o elemento sensor. Ajuste o conjunto óptico do sensor até que ele esteja a uma distância de 10mm do sensor.

7) A emissividade que estamos medindo é a emissividade hemisférica total do material. Para tanto o sensor deve estar posicionado na direção da normal à superfície do CP. Sugere-se usar um paquímetro para verificar se o centro da lente do sensor está na direção normal do ponto médio da lateral do cilindro.

8) Tampe a câmara e ligue a bomba de vácuo.

9) Lentamente gire o registro da tampa de modo que a pressão interna da câmara vá aumentando uniformemente. Acompanhe pelo vacuômetro até que a pressão interna atinja 220mmHg.

10) Foi utilizado um anemômetro Hobbyking como referência para medir a temperatura ambiente. Certifique-se que as medidas do anemômetro e do sensor infravermelho medindo o CP na parte da fita tenham a mesma leitura ou uma variação instrumental de no máximo 0,2 °C.

11) Cubra a caixa com o courino.

12) Abra o software Compact Connect e sincronize ambos sensores infravermelhos no software. Ajuste no software a transmissividade para 0,992 (referente à transmissividade da lente de foco fechado). Neste trabalho foi ajustada no software uma medição a cada 0,5s durante 2h.

13) Ligue o multímetro nos terminais de entrada do trafo.

14) Inicie o cronômetro e as medições do software.

15) Gire o potenciômetro do VARIAC até que o multímetro marque 0,2V na entrada do trafo. Verifique o aumento de temperatura no CP.

16) Para cada incremento na temperatura do CP ajuste a emissividade do sensor 2(que está na direção da porção sem fita do CP) para que o valor lido por este sensor coincida com o valor lido pelo sensor 1.

17) Quando o equilíbrio térmico for atingido dê um incremento de 0,1V na tensão de entrada do VARIAC.

18) Repita os passos 16 e 17 até que os sensores leiam a temperatura de 75°C.

19) Desligue o sistema de aquecimento.

20) Tire o courino de cima da caixa.

21) Abra o registro da tampa da caixa lentamente permitindo que o ar entre e a pressão no interior da câmara se iguale à pressão atmosférica.

22) Desligue a bomba de vácuo.

23) Uma vez que o CP retornar à temperatura ambiente pode-se fazer outro ensaio repetindo os passos de 1 a 23 do Procedimento 1.

Procedimento 2:

Este é o procedimento que deve ser adotado para realizar o ensaio com a SMA, que neste caso é um componente de NiTi, quando se desejar um estudo da variação da emissividade do material em função da temperatura.

1) Verifique se o CP do aço atende às condições dimensionais especificadas, isto é, se sua forma é cilíndrica de dimensões 100mm de comprimento e 10mm de diâmetro.

2) Em uma das extremidades do cilindro coloque uma camada de fita isolante de emissividade 0.95.

3) O componente de NiTi utilizado neste trabalho tem, como valores de temperatura de transformação de fase $A_s = 57,01$ °C, $A_f = 74,80$ °C, $M_s = 41,41$ °C e $M_f = 15,65$ °C. Estes valores foram obtidos fazendo-se o DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) de uma amostra da SMA. O DSC do NiTi está mostrado no Anexo I. Assim, em temperatura ambiente o CP não necessariamente está totalmente na fase martensítica. É necessário garantir que o ensaio se inicie quando o CP estiver com fase 100% martensítica. Para tanto, coloque o CP num congelador a -7°C por 10-15min. Isto fará com que a fase esteja 100% martensítica.

4) Uma vez garantida a condição martensítica do CP: com a bomba de vácuo desligada, tire a tampa da câmara de vácuo e acople o CP nos *ring terminals* e parafuse para garantir a fixação.

5) Siga os passos de 4 a 22 do Procedimento 1.

6) Uma vez que o CP retornar à temperatura ambiente pode-se fazer outro ensaio repetindo os passos de 1 a 6 do Procedimento 2.

Com isso pode-se passar para a fase de teste e validação da eficácia do aparato e procedimento.

5 TESTE DA BANCADA

Este capítulo apresenta os resultados obtidos no teste da bancada para medição de emissividade.

5.1 TESTES PRELIMINARES DA BANCADA

O teste da bancada será feito com o CP de aço. Visto que já existem na literatura [22] valores tabelados para a emissividade do aço, uma forma de verificar a validade do aparato e procedimento propostos é comparar o resultado de emissividade obtido com o existente na literatura.

Primeiramente foram realizados ensaios-teste para verificar as condições da bancada. Estes testes visam verificar o funcionamento de cada sistema da bancada para então seguir-se para o teste completo da bancada. Destarte, os ensaios-teste subdividiram-se em:

1) Teste da condição do vácuo. Neste teste fechou-se a caixa de acrílico após todas as vedações terem sido colocadas, ligou-se a bomba de vácuo e lentamente fechou-se o registro na tampa. Durante o procedimento monitorou-se cuidadosamente o vacuômetro para notar a taxa de aumento da pressão conforme a válvula do registro era fechada. Uma vez atingida a pressão de 220mmHg a câmara é deixada estabilizar. A fim de testar a resistência da câmara e possíveis locais de entrada de ar, a câmara é deixada neste estado de pressão por aproximadamente 30min. Neste período fez-se as seguintes observações:

- A deflexão das paredes da caixa foram minimizadas devido a ação dos braços de acrílico;
- A caixa resistiu à pressão pelo tempo de 30min sem demonstrar nenhum sinal de vibração ou local de possível ruptura;
- A pressão foi monitorada por meio do vacuômetro durante todo o teste se manteve estável em 220mmHg;
- O flange por onde passam os cabos de força e de instrumentação apresentou defeito de vedação, permitindo entrada de ar;
- Os vértices da borda superior da caixa, entre as peças de borracha apresentaram defeito de vedação, permitindo a entrada de ar.

Foi utilizado fita veda-rosca para vedar os vértices da borda da caixa com o intuito de impedir a entrada de ar. A entrada dos cabos foi reforçada com fita isolante na tentativa de corrigir o defeito de vedação. Outros três testes como o acima foram realizados, todos tiveram os mesmos resultados e todas as observações salvo uma foram pertinentes. O ponto que nos demais ensaios realizados não foi observado foi a falha na vedação dos vértices. A fita veda-rosca foi capaz de impedir a entrada de ar pelo vértices da borda da caixa.

Concluiu-se que a câmara é confiável e atende aos requisitos de projeto perfeitamente.

2) Teste do sistema de aquecimento. Neste teste fixou-se primeiramente o CP de aço nos ring terminals. Um multímetro foi ligado aos terminais de entrada do trafo para monitorar a tensão. O Sensor 1 foi utilizado como referência para verificar o aquecimento do CP. Ligou-se o disjuntor com o VARIAC na posição de transformação 220/0V. Em seguida aumentou-se a tensão de saída do VARIAC lentamente, em incrementos de 0,5V e observou-se a variação na temperatura do CP causada por esta tensão. Antes de novo incremento esperava-se que o sistema entrasse em equilíbrio térmico. Fez-se algumas observações:

- A taxa de aumento da temperatura do CP com o incremento de 0,5V foi bastante acentuada.
- Ao chegar em 1,5V e equilíbrio térmico foi constatado o superaquecimento do trafo, o que levou a parada de emergência do teste.
- Conseguiu-se atingir a temperatura máxima projetada de 90°C.

No segundo teste optou-se por incrementos de 0,2V. Os seguintes acontecimentos devem ser relatados:

- A taxa de aumento da temperatura do CP no primeiro incremento foi satisfatória, contudo, do segundo incremento em diante a taxa tornou-se a se mostrar elevada.
- Ao chegar em 1V e equilíbrio térmico notou-se o superaquecimento do trafo, embora menor do que aquele verificado no primeiro ensaio.
- Conseguiu-se atingir a temperatura máxima projetada de 90°C.

No terceiro teste optou-se por utilizar apenas o primeiro incremento como sendo 0,2V e os demais como sendo de 0,1V. Deste ensaio surgem as seguintes observações:

- A taxa de aumento da temperatura foi satisfatória durante todo o ensaio.
- Ao chegar em 1V foi novamente detectado superaquecimento do trafo.
- Conseguiu-se atingir a temperatura máxima projetada de 90°C.

No quarto ensaio foi adaptado um cooler de computador sobre o trafo, que permaneceu ligado durante todo o teste e manteve-se os incrementos como definidos no terceiro ensaio. Os resultados foram os seguintes:

- A taxa de aumento da temperatura foi satisfatória durante todo o ensaio.
- Não foi detectado superaquecimento do trafo.
- Conseguiu-se atingir a temperatura máxima projetada de 90°C.

Outros dois ensaios nos mesmos moldes do quarto foram realizados e todos tiveram os mesmos resultados. Repetiu-se os testes conforme o quarto ensaio com o CP de NiTi. Foi constatado que

apesar de as taxas de aquecimento não serem as mesmas para os dois CPs, os resultados gerais foram os mesmos, isto é, para o CP de NiTi teve-se como resultados dos ensaios-teste:

- A taxa de aumento da temperatura foi satisfatória durante todo o ensaio.
- Não foi detectado superaquecimento do trafo.
- Conseguiu-se atingir a temperatura máxima projetada de 90°C.

Concluiu-se que o sistema de aquecimento é confiável e atende aos requisitos de projeto perfeitamente.

3) Teste do sistema de aquisição. Neste teste utilizou-se o CP de Niti e o sistema de aquecimento. Abriu-se uma instância do software Compact Connect e fez-se a sincronização deste com o Sensor 1 apontado para o CP de NiTi. Ajustou-se os parâmetros do software como a seguir:

- 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;
- Emissividade ajustada: 0,95;
- Transmissividade ajustada: 0,992;
- Alarmes: 30°C e 100°C;
- Unidade: °C;
- Mostrar no display da tela: Tproc = Temperatura do processo;
- Diretório de gravação dos dados: C:\Thiago\Compactconnect.

Vale ressaltar que estes parâmetros são parâmetros de configuração do software que precisam ser ajustados para que seja possível o monitoramento e gravação das temperaturas lidas. O tempo do ensaio e número de dados de aquisição correspondem a um valor arbitrariamente alto, apenas para que se garanta que o ensaio não seja interrompido por limitação destes parâmetros visto que o ensaio pode ser interrompido para valores menores que estes limites sem prejuízo algum.

Seguiu-se para o início do ensaio e gravação dos dados. O ensaio teste foi realizado nos moldes do quarto ensaio-teste do sistema de aquecimento até que o CP atingisse 90°C. Atingida esta temperatura encerrava-se o ensaio e parava-se a gravação de dados e monitoramento das temperaturas no software.

Gravou-se os dados coletados como teste1.dat no diretório mencionado acima. O arquivo de extensão .dat é um arquivo de dados de formato canônico. O Software abre o arquivo, mas a única curva que ele pode exibir é temperatura x tempo. Utilizou-se então o programa Microsoft Excel 2007 para abrir o arquivo. A forma de saída dos dados para o usuário é como mostrado na Figura 5.1.

O cabeçalho da planilha informa data e hora do ensaio, sistema de unidades utilizado e resolução da coleta. A planilha então oferece 12 colunas com os dados coletados a cada 500ms. As colunas de F a L referem-se a funções não disponíveis para os sensores adquiridos e, portanto, o valor zero é constante em todas as linhas destas colunas.

A primeira coluna é o tempo. A segunda e a quinta colunas são a temperatura do objeto e a temperatura do processo, respectivamente. Para as aplicações deste trabalho estas duas medidas são iguais, portanto estas colunas apresentam valores idênticos.

A terceira coluna é uma variável de controle interna do sensor. A quarta coluna é a temperatura interna da caixa do radiômetro.

Time	TObj	Tint	TBox	Tact	T2C	T1C	ATTENUA	Epsilon	mVin	Vcc	TAmb
00:00:00.000	28.1	25.2	26.4	28.1	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:00.500	28.1	25.2	26.4	28.1	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:01.000	28.1	25.2	26.4	28.1	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:01.500	28.2	25.2	26.4	28.2	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:02.000	28.2	25.2	26.4	28.2	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:02.500	28.1	25.2	26.4	28.1	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:03.000	28.2	25.2	26.4	28.2	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:03.500	28.2	25.2	26.4	28.2	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:04.000	28.2	25.2	26.4	28.2	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:04.500	28.2	25.2	26.4	28.3	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:05.000	28.2	25.2	26.4	28.2	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:05.500	28.3	25.2	26.4	28.3	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:06.000	28.3	25.2	26.4	28.3	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:06.500	28.3	25.2	26.4	28.3	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:07.000	28.3	25.2	26.4	28.3	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:07.500	28.3	25.2	26.4	28.3	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:08.000	28.4	25.2	26.4	28.3	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:08.500	28.3	25.2	26.4	28.3	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:09.000	28.3	25.2	26.4	28.4	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:09.500	28.4	25.2	26.4	28.4	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:10.000	28.4	25.2	26.4	28.4	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:10.500	28.5	25.2	26.4	28.4	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:11.000	28.5	25.2	26.4	28.5	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:11.500	28.5	25.2	26.4	28.5	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:12.000	28.5	25.2	26.4	28.4	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:12.500	28.5	25.2	26.4	28.5	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:13.000	28.5	25.2	26.4	28.5	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:13.500	28.5	25.2	26.4	28.5	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:14.000	28.5	25.2	26.4	28.5	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:14.500	28.5	25.2	26.4	28.5	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:15.000	28.5	25.2	26.4	28.6	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:15.500	28.6	25.2	26.4	28.6	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:16.000	28.6	25.2	26.4	28.6	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0
00:00:16.500	28.7	25.2	26.4	28.6	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000	0.000	0.0

Figura 5.1 – Arquivo de saída com os dados coletados pelo Compact Connect.

De posse dos dados foi possível importá-los para o software MatLab, onde são feitas as análises dos dados. Este teste foi realizado mais uma vez com o CP de aço e chegou-se a resultados similares. Concluiu-se que o sistema de aquisição de dados é confiável e atende aos requisitos de projeto perfeitamente.

Encerrados os testes preliminares passou-se ao teste da bancada completa, isto é, ao ensaio de medição de emissividade propriamente dito. O CP usado na validação da bancada foi o CP de aço polido.

5.2 TESTE DA BANCADA COM CP DE AÇO

Com o objetivo de verificar a influência do vácuo na medição da emissividade de um objeto, primeiro fez-se dois ensaios com o CP de aço seguindo o Procedimento 1 descrito na seção 4.2 com a exceção dos passos referentes à indução, controle e eliminação do vácuo no interior da câmara. As Figuras 5.2 e 5.3 mostram os resultados obtidos nestes ensaios.

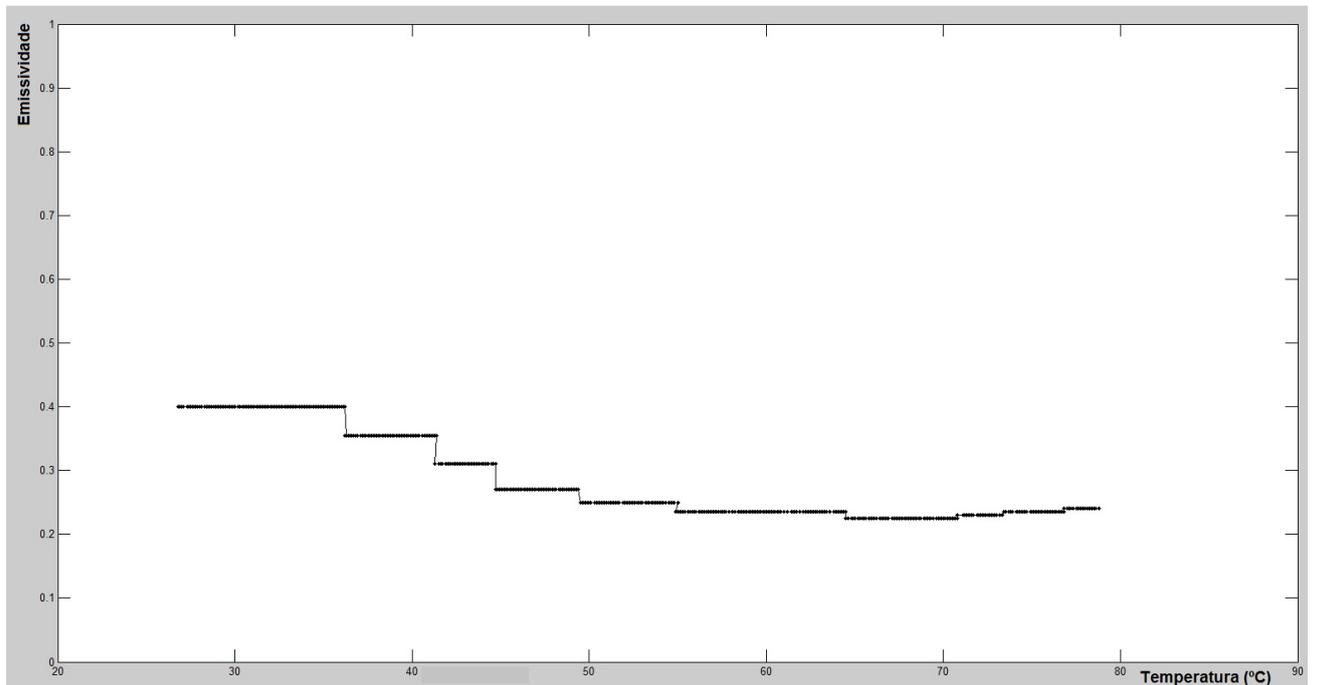


Figura 5.2 - curva emissividade x temperatura para o aço na condição de teste sem vácuo, ensaio 1.

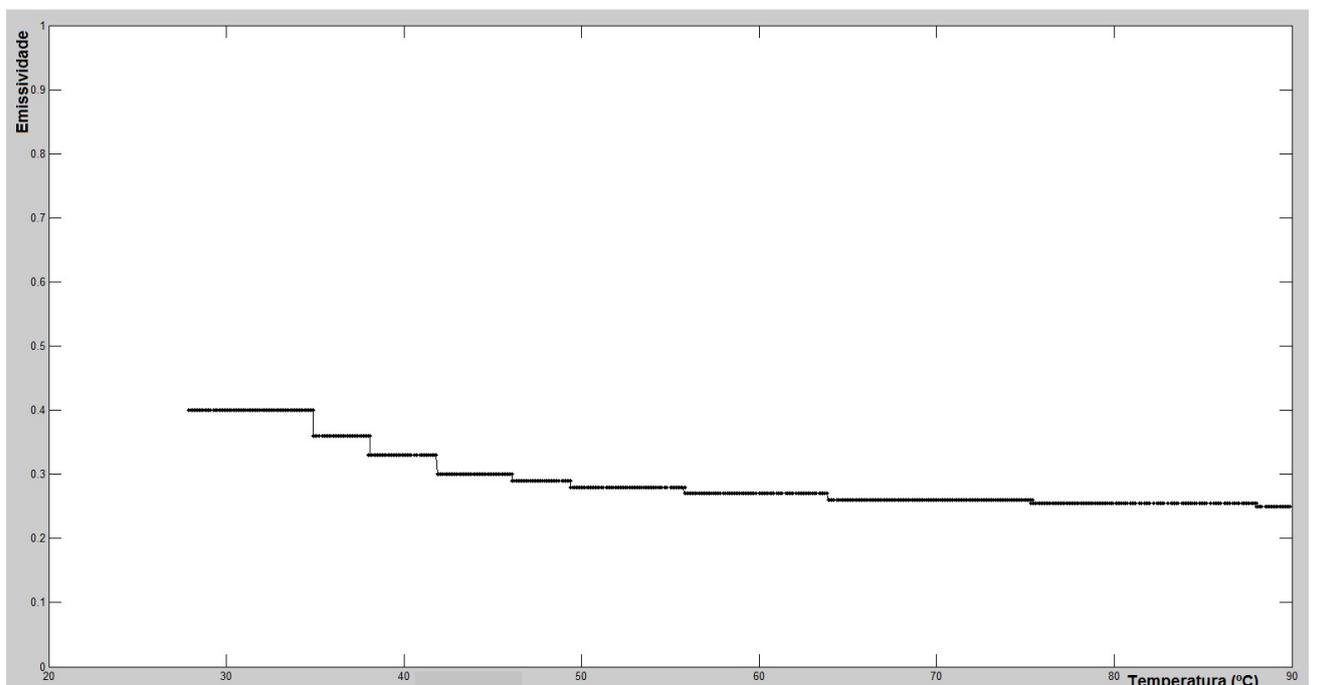


Figura 5.3 - curva emissividade x temperatura para o aço na condição de teste sem vácuo, ensaio 2.

Para estes casos a emissividade média obtida para o aço foi de 0,306. O valor tabelado encontrado na literatura [22] para a emissividade do aço nesta faixa de temperatura (20°C a 90°C) é de 0,16. Assim, o erro obtido para este caso foi de 91,2%. Cabe-se fazer as seguintes observações:

- A emissividade de materiais metálicos, como o aço, é aproximadamente constante para baixos valores de temperatura, como é o caso do experimento. Contudo, as Figuras 5.2 e 5.3 mostram que houve uma variação da emissividade do aço ao longo do ensaio que chegou a 40%;

- A emissividade aumenta conforme o aumento da temperatura para materiais condutores. Dessa forma, a emissividade deveria aumentar no decorrer do ensaio, os gráficos das Figuras 5.2 e 5.3 mostram exatamente o oposto.

As razões mais prováveis para estes erros consistem nos aspectos termodinâmicos da presença de ar ao redor do experimento. O ar permite, predominantemente, perda de calor, por parte do CP, por convecção. Essa perda mascara a real temperatura do CP, de modo que a radiação térmica lida pelo sensor não tem correspondência direta com a temperatura do CP. A Figura 5.4 ilustra fatores que influenciam na medição da emissividade de um corpo e ajudará na explanação dos outros pontos que tiveram influência neste resultado e nos resultados que serão mostrados mais adiante neste trabalho.

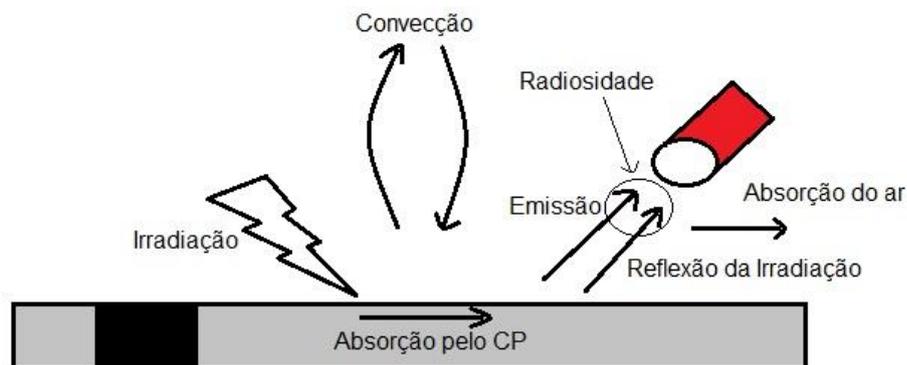


Figura 5.4 – Esquema da radiação térmica ao redor do CP.

O objetivo do trabalho é determinar a emissividade de um material. Para tanto faz-se uso de um sensor de radiação térmica, que irá medir a quantidade de radiação térmica que chega até ele. A quantidade de radiação térmica emitida por um corpo depende da temperatura a que este corpo se encontra. Assim, a fim de determinar a temperatura de um corpo é preciso conhecer a quantidade de radiação térmica emitida por este corpo.

Dado que a radiação térmica emitida pelo corpo é a radiação diretamente ligada à temperatura do corpo, para que se conheça a temperatura real do corpo por termometria infravermelha é necessário que a radiação medida pelo sensor, isto é, a radiação térmica que chega ao sensor seja o mais próximo

possível da radiação emitida pelo corpo. Destarte, todo efeito que alterar essa condição é prejudicial para a medição e deve ser eliminado ou minimizado.

A Figura 5.4 mostra um esquema das radiações térmicas de interesse envolvendo o sistema CP – sensor de radiação térmica (representado em vermelho na figura). Como dito em seções anteriores, existe a irradiação térmica, que corresponde à soma das radiações térmicas, em todas as direções e comprimentos de onda, emitidas por outros objetos nas imediações do CP. Esta irradiação incidente sobre o CP será parcialmente absorvida e parcialmente refletida. Além disso, sabe-se que o ar não é transparente à radiação térmica, isto é, a transmissividade do ar (Figura 2.17) não é de 100%.

A transmissividade do ar depende do comprimento de onda da radiação térmica [17]. Assim, uma parcela da radiação térmica será absorvida pelo ar. A radiosidade é a quantidade total de radiação que sai da superfície de um material. Levando em consideração o exposto acima, conclui-se que a radiação térmica medida pelo sensor na presença de ar é uma mistura da radiação emitida pelo CP, que é a radiação de interesse, e a parte refletida da irradiação, sendo ambas atenuadas pelo ar, que absorve uma parcela dessas radiações. Por conseguinte, a radiação térmica medida pelo sensor é apenas parcialmente referente a real temperatura do corpo. Com isso concluiu-se que as curvas obtidas para a emissividade do aço nestes ensaios são insatisfatórias. Passou-se então aos ensaios com uso do vácuo.

Foram feitos três ensaios com o CP de aço seguindo o Procedimento 1 descrito na seção 4.2. As Figuras de 5.5 a 5.7 mostram os resultados obtidos nestes ensaios e a Figura 5.8 mostra o perfil de variação da temperatura com o tempo. Os gráficos emissividade x temperatura foram gerados utilizando o MatLab. A temperatura é dada em °C. Como a emissividade é um valor relativo, ela varia de 0 a 1, portanto, os gráficos apresentados estão nesta escala.

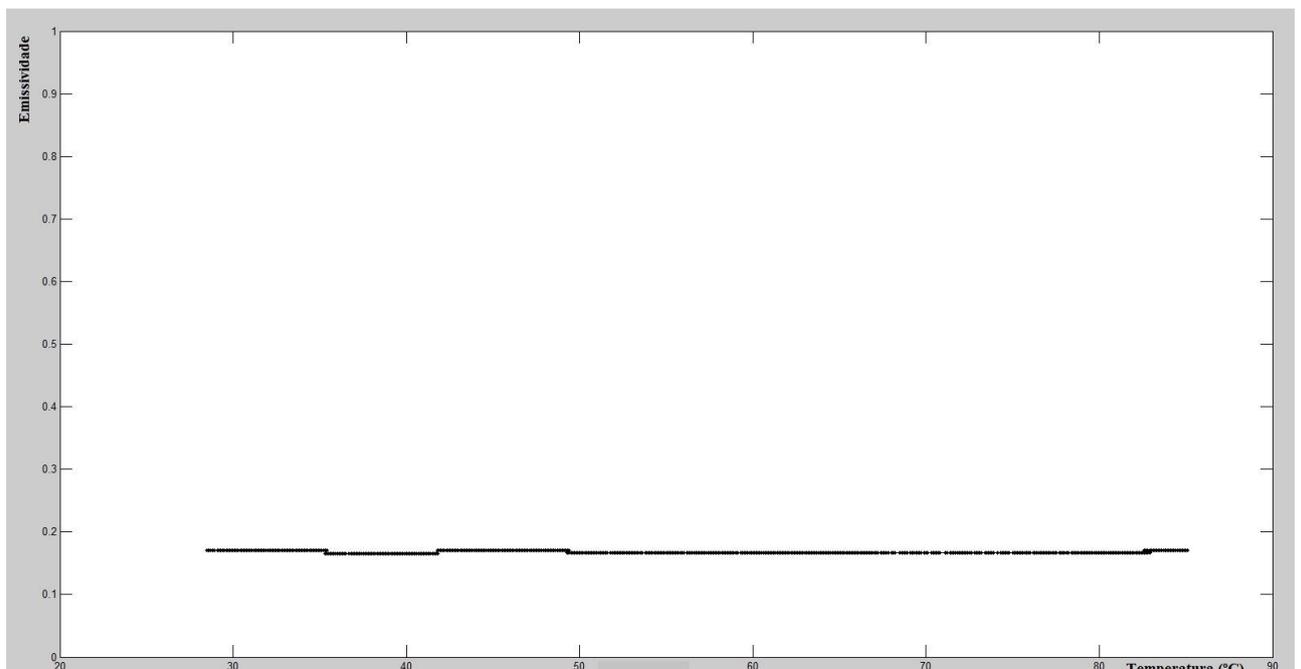


Figura 5.5 – curva emissividade x temperatura para o aço, ensaio 1.

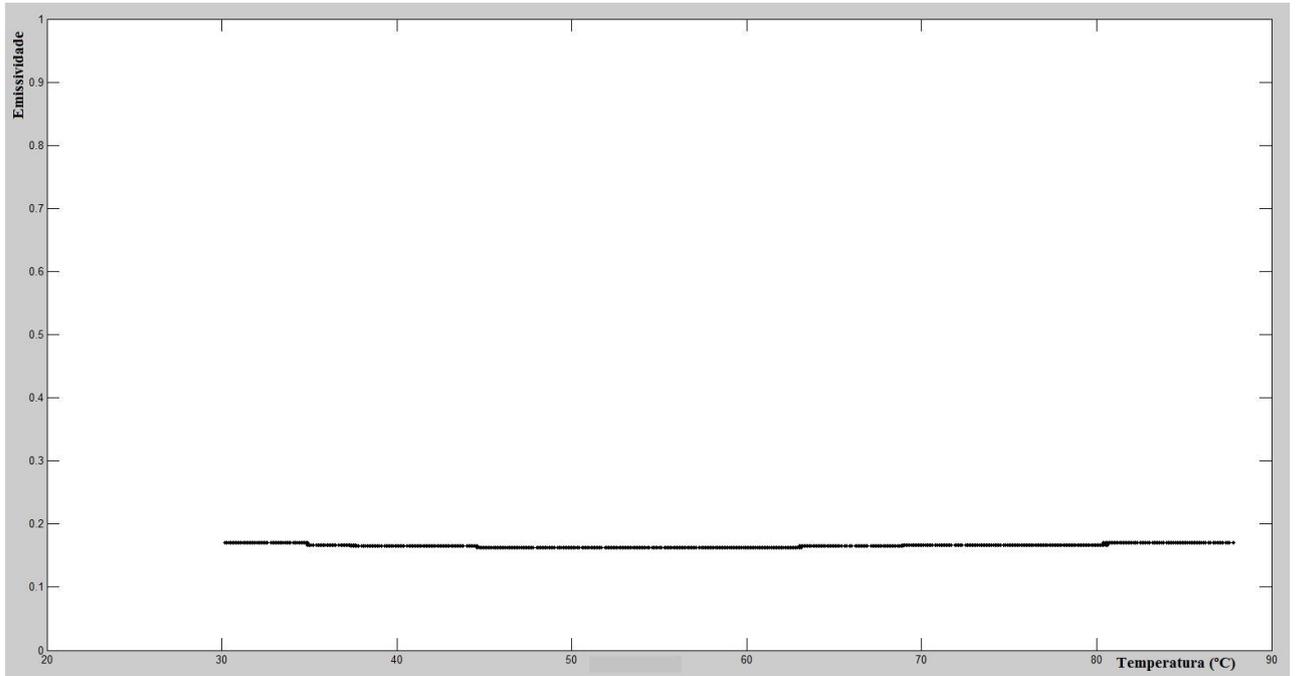


Figura 5.6 - curva emissividade x temperatura para o aço, ensaio 2.

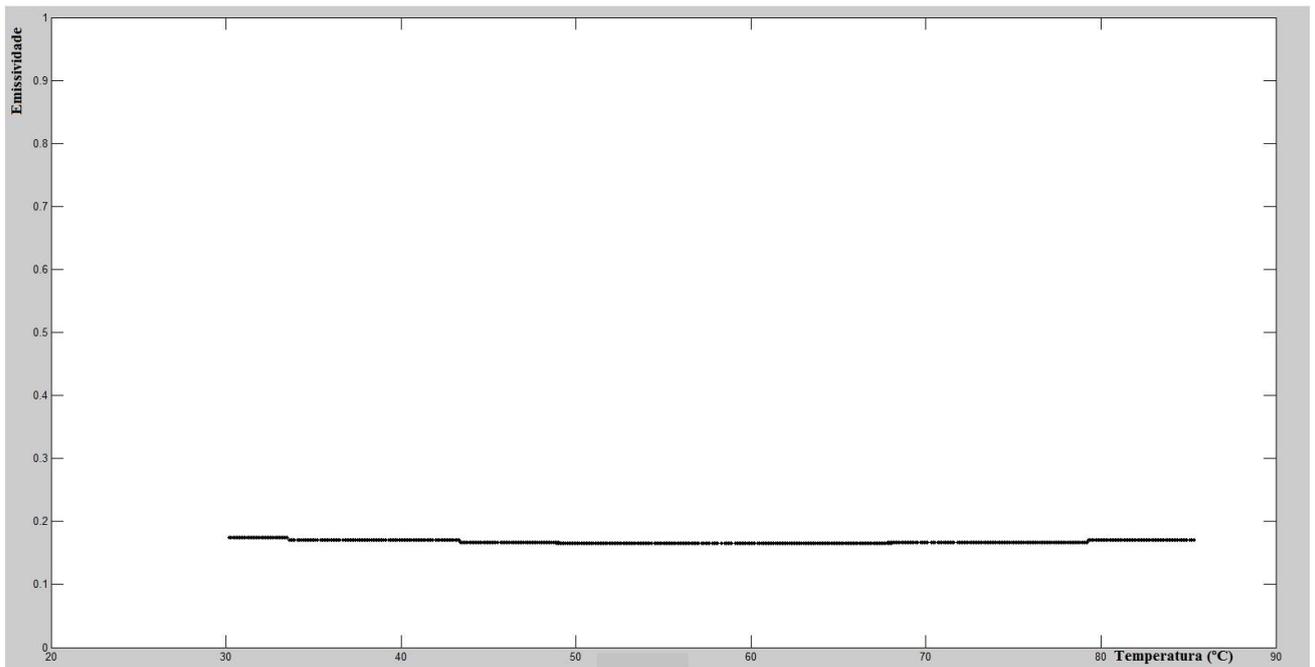


Figura 5.7 - curva emissividade x temperatura para o aço, ensaio 3.

Analisando as Figuras 5.5 a 5.7 podemos notar que a emissividade do aço foi aproximadamente constante na faixa de temperaturas avaliadas, assumiu valores de emissividade baixos e pode-se observar o mesmo comportamento da curva em todos os três ensaios.



Figura 5.8 – Software Compact Connect, curva temperatura x tempo para os ensaios com aço.

A teoria diz que metais tem baixa emissividade e para uma pequena amplitude de temperaturas, especialmente em temperaturas baixas, a emissividade de um material metálico convencional varia muito pouco. Deste modo, todos os resultados obtidos estão de acordo com a teoria.

Além disso, a emissividade média do aço calculada nas curvas foi de 0,167, valor bem próximo ao valor tabelado de 0,16. O erro da medida foi de aproximadamente 4,2%. A Figura 5.8 mostra o perfil de aquecimento do aço em função do tempo. Pode-se notar que o aquecimento foi aproximadamente linear e contínuo para uma escala que mostra a totalidade do ensaio. Assim, pode-se fazer os seguintes comentários:

- A curva de emissividade obtida apresenta valor aproximadamente constante para a faixa de temperaturas do ensaio, comportamento condizente com a teoria e contrário ao encontrado nos ensaios sem vácuo;
- O valor médio encontrado para a emissividade foi de 0,167, bem próximo do valor tabelado;
- A precisão dos resultados entre os ensaios foi de 1%;
- Visto que os ensaios com vácuo resultaram em curvas e valores condizentes com a teoria e valores tabelados e que os resultados obtidos sem vácuo não foram condizentes, pode-se atestar que o vácuo é necessário para a correta medição da emissividade de materiais.

A superposição das curvas evidenciada pelo gráfico da Figura 5.9 associada com os resultados já discutidos acima corrobora para que o aparato e procedimento sejam considerados válidos e confiáveis para a medição da relação entre emissividade e temperatura de materiais metálicos.

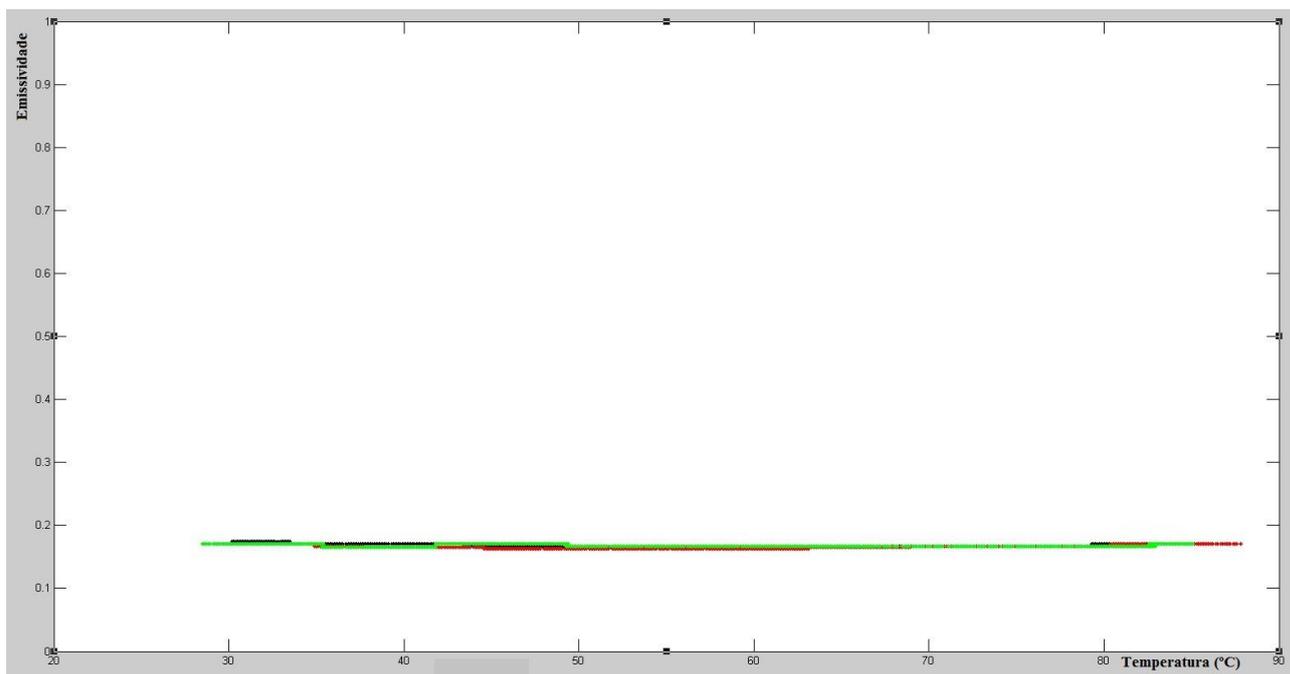


Figura 5.9 – Ensaios com CP de aço.

5.3 RESULTADOS DA SMA

Uma vez definida a confiabilidade da bancada para medição da emissividade de objetos, podemos expandir nossa análise para materiais de emissividade desconhecida. SMAs são materiais com enorme potencial de aplicação caso seja possível utilizar a termometria infravermelha para monitoramento da sua temperatura. A dificuldade reside no fato de que as propriedades termomecânicas de SMAs variam de acordo com a temperatura. É imprescindível que se obtenha uma função de dependência da emissividade com a temperatura de uma SMA para que se possa fazer uso prático desta propriedade.

Dadas as características próprias do material e os estudos sobre outras propriedades da SMA que não a emissividade, especula-se que a emissividade de uma liga NiTi, por exemplo, apresente comportamento histerético quando relacionada com a temperatura e que as transformações de fase influenciem na emissividade da liga.

O objetivo deste experimento é testar estas hipóteses e levantar uma função de dependência entre emissividade e temperatura em uma liga NiTi. Para tanto foram feitos dois ensaios com o CP de NiTi seguindo o Procedimento 2 descrito no capítulo anterior. Não foram feitos ensaios sem vácuo pois os

resultados do aço apontaram que resultados confiáveis só podem ser obtidos com vácuo. As Figuras 5.10 e 5.11 mostram os resultados. A Figura 5.12 mostra o perfil de variação da temperatura com relação ao tempo para o CP de NiTi.

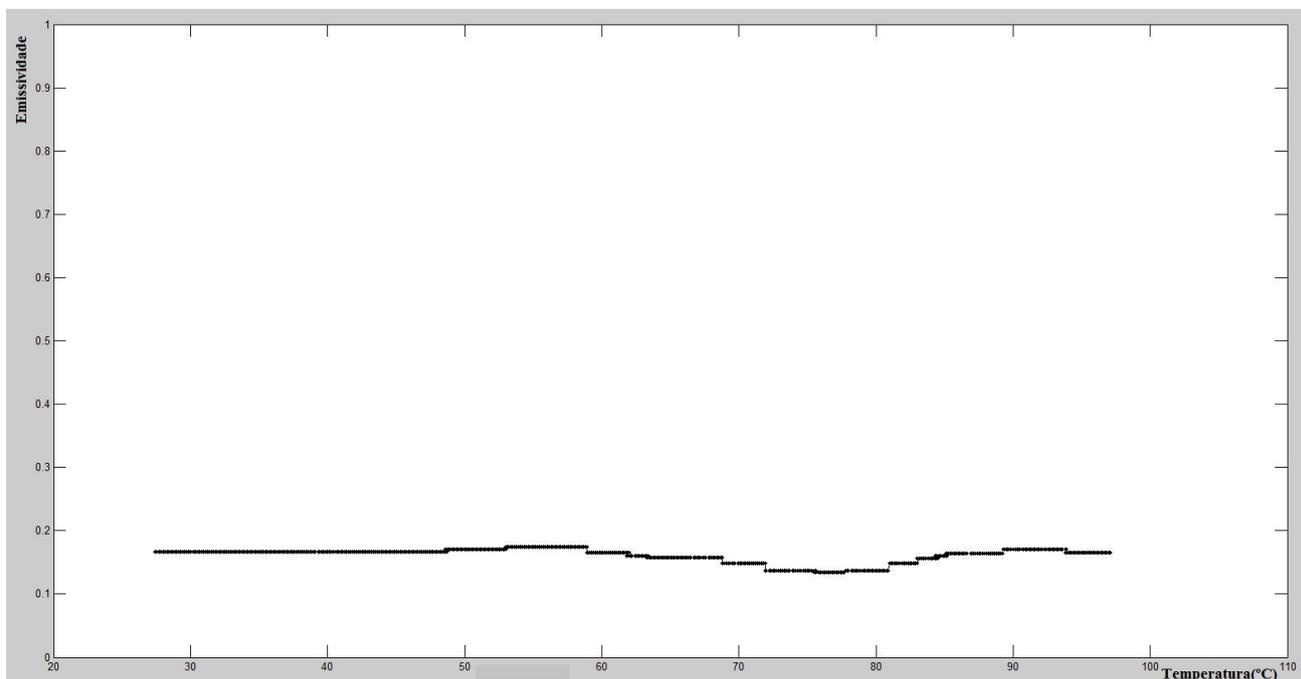


Figura 5.10 – Curva emissividade x temperatura para o NiTi, ensaio 1.

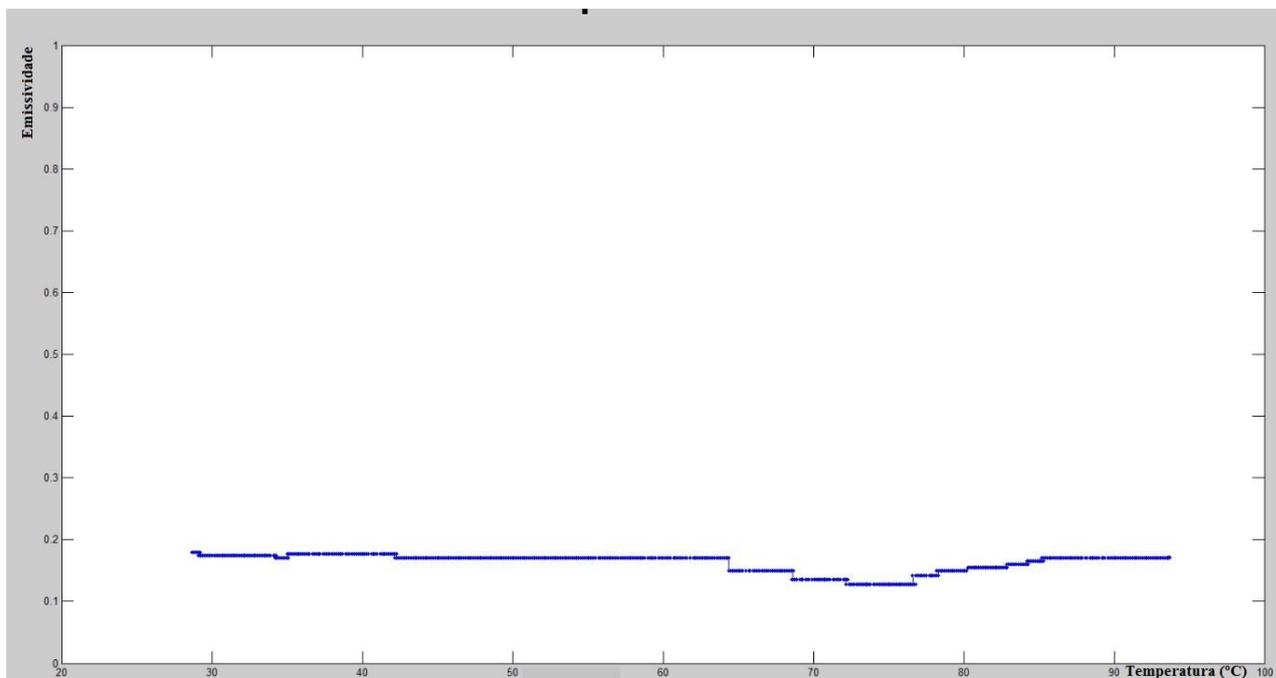


Figura 5.11 – Curva emissividade x temperatura para o NiTi, ensaio 2.

Se observarmos as Figuras 5.10 e 5.11 veremos que o comportamento geral do NiTi assemelha-se ao comportamento de materiais metálicos na mesma faixa de temperatura. Apresenta um baixo valor de emissividade e a variação no valor da emissividade não é grande. Contudo, observa-se também uma região em que há uma variação abrupta de emissividade. Valem as seguintes observações:

- O comportamento geral da emissividade do NiTi assemelha-se ao comportamento de materiais metálicos convencionais;
- A precisão dos resultados entre os ensaios foi de 2%;
- Houve uma variação da emissividade do NiTi numa dada faixa de temperaturas que não é encontrada em materiais convencionais.

A Figura 5.12 mostra o perfil de aquecimento do aço em função do tempo. Pode-se notar que o aquecimento foi aproximadamente linear e contínuo para a escala definida. Para efeito de comparação de resultados a Figura 5.13 mostra as duas curvas no mesmo gráfico.

Pode-se observar que os resultados foram compatíveis entre si, o que indica o sucesso em determinar experimentalmente a curva de emissividade em função da temperatura de uma liga de NiTi. Tendo em vista explorar o que realmente ocorre com a emissividade do NiTi nessa faixa de temperatura reduziu-se drasticamente a escala para observar o que acontece. Isto é mostrado nas Figuras 5.14 e 5.15.

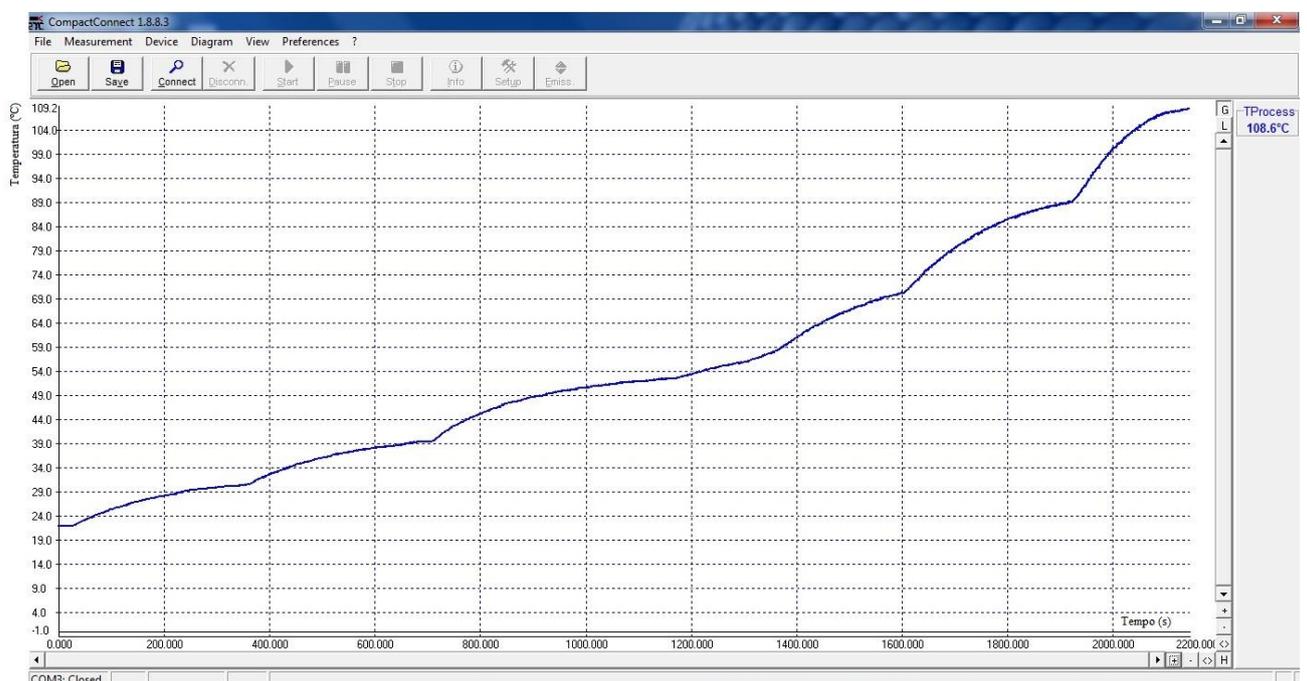


Figura 5.12 – Software Compact Connect, curva temperatura x tempo para os ensaios com o NiTi.

As Figuras 5.14 e 5.15 são um zoom dado nas curvas das Figuras 5.10 e 5.11, respectivamente. Pode-se notar que há uma variação brusca na emissividade do NiTi numa determinada faixa de

temperatura. Se compararmos a faixa de temperatura em que ocorre a variação com as temperaturas de transformação de fase do NiTi podemos concluir que a variação ocorre justamente na faixa de temperatura em que está ocorrendo transformação de fase.

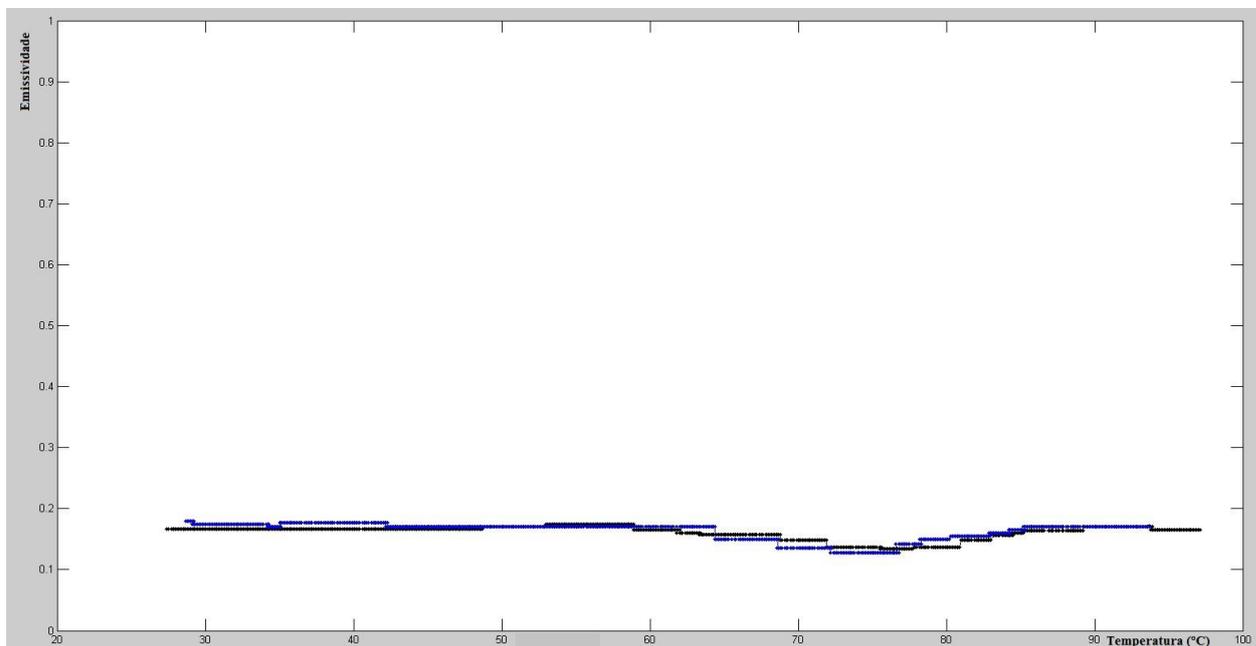


Figura 5.13 – Ensaio com o CP de NiTi.

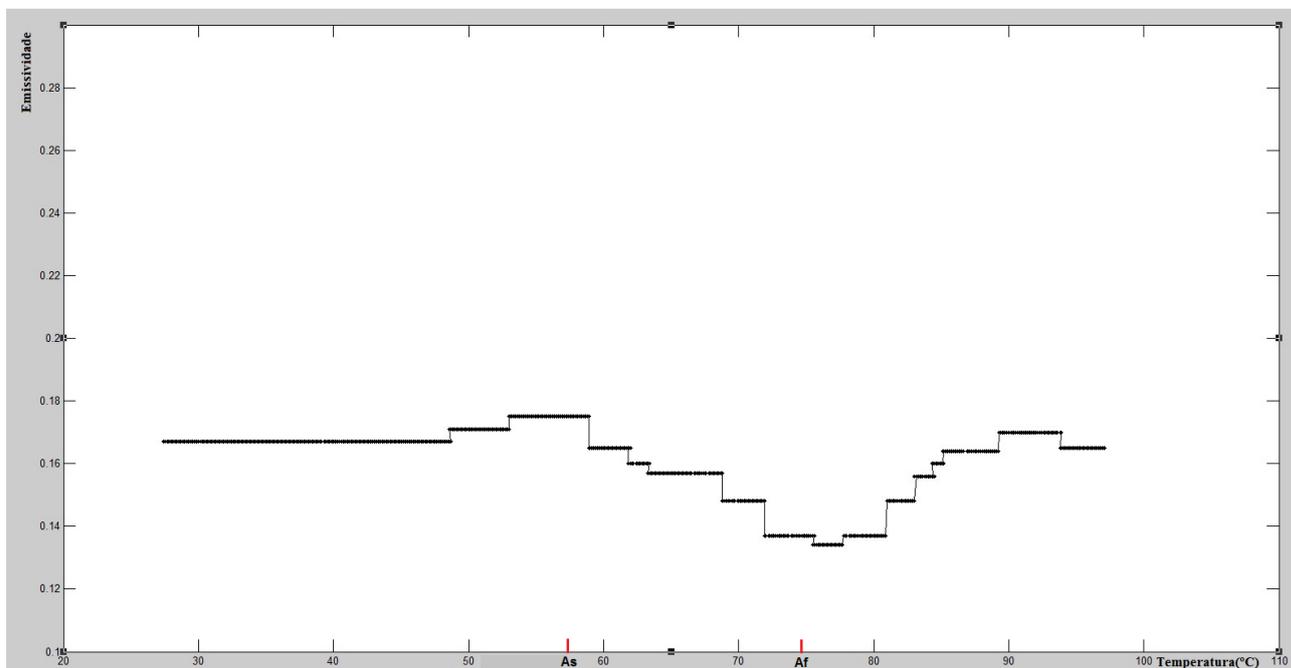


Figura 5.14 – Curva em escala reduzida do gráfico da Figura 5.10.

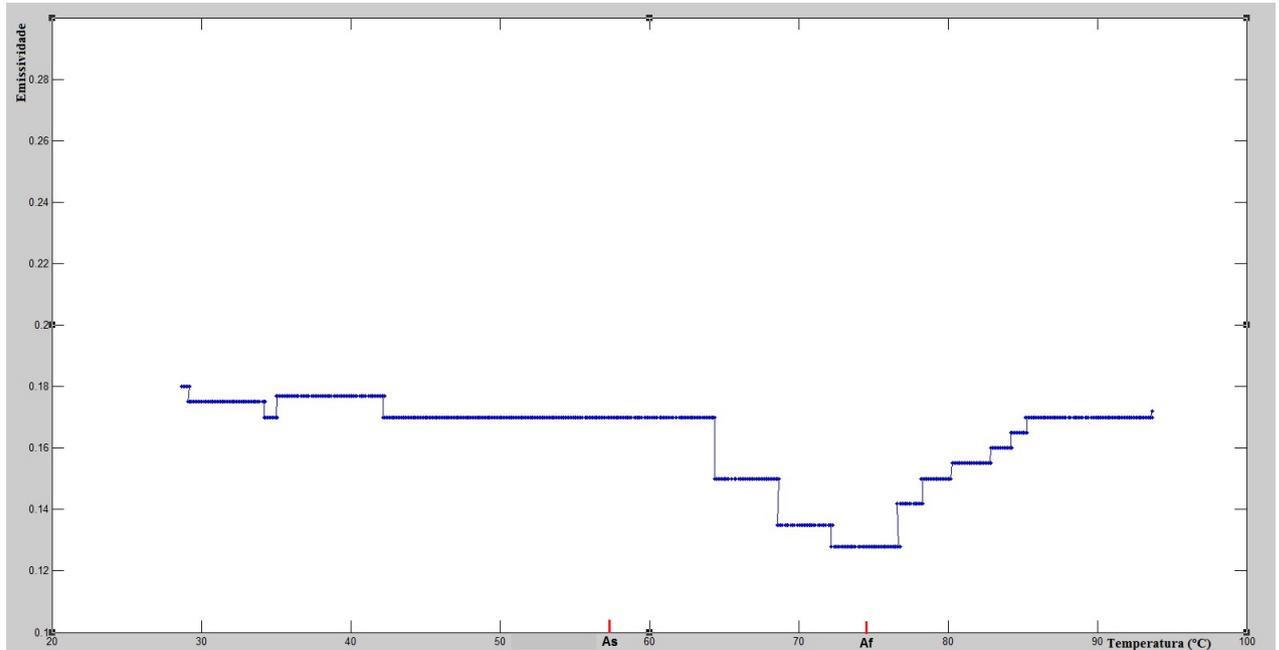


Figura 5.15 - Curva em escala reduzida do gráfico da Figura 5.11.

Isso confirma a hipótese de que a transformação de fase influencia na emissividade de uma SMA. Pode-se observar que há uma queda no valor da emissividade durante a transformação de fase. Após o término da transformação de fase, quando o material se encontra totalmente austenítico, o valor da emissividade volta a subir até um patamar próximo ao encontrado no NiTi martensítico.

A variação entre o valor imediatamente anterior ao início da queda e o valor mínimo obtido no fim da queda é de 0,041, que corresponde a uma variação percentual de 23,4%. Para determinar a variação na medida da temperatura devido a esta variação na emissividade substitui-se a Equações 2.9 na Equação 2.15, obtendo – se a Equação 5.1:

$$T^4 = \frac{E(t)}{\varepsilon\sigma} \tag{5.1}$$

tomando-se T_1 como a temperatura medida pelo sensor sem a correção da emissividade, T_2 a temperatura real do corpo, ε_1 a emissividade antes da queda, isto é, a emissividade não ajustada, e ε_2 a emissividade real do corpo e faz – se (Equação 5.2):

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

Resolvendo 5.2 para T2 obtém-se a Equação 5.3:

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

onde T2 é a temperatura real do corpo e T1 a temperatura medida caso não haja correção da emissividade. Para o caso deste experimento tem-se que, para o NiTi utilizado (Equação 5.4):

$$T_2 = 1,07.T_1 \quad 5.4$$

O que significa que a temperatura real é 7% maior que a temperatura lida sem correção da emissividade. A Figura 5.16 mostra a escala reduzida das duas curvas juntas. Os seguintes comentários podem ser feitos:

- Ficou evidente que a transformação de fase influencia a emissividade da SMA;
- Para o NiTi a variação no valor da emissividade foi de 23,4%, que corresponde a uma diferença de 7% nos valores lidos para a temperatura;

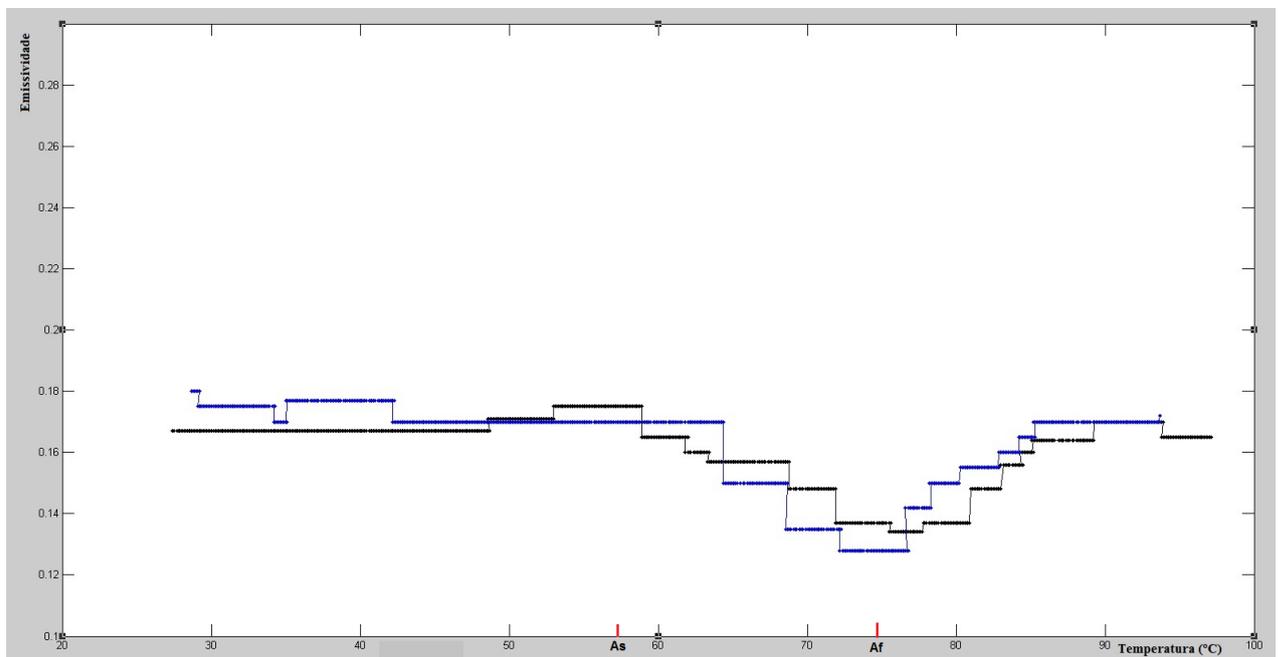


Figura 5.16 – Curva em escala reduzida do gráfico da Figura 5.13.

- Foi possível determinar experimentalmente a curva que define a relação entre emissividade e temperatura para uma SMA de NiTi;

- Uma vez que a liga atinge a fase austenítica o valor da emissividade aumenta progressivamente até um valor próximo daquele encontrado na SMA em fase martensítica. A diferença percentual entre austenita e martensita foi de 2,8%.

Infelizmente com o presente aparato não é possível testar a hipótese histerética do comportamento da SMA de maneira eficaz. Isto porque não há um sistema de refrigeração implementado na bancada, o que impossibilita o resfriamento do CP de NiTi até abaixo da temperatura M_f . Consequência disso é que embora a transformação de fase de martensita para austenita possa ser completada e avaliada, a transformação de fase de austenita para martensita não se completa. Destarte não há como realizar um ensaio de resfriamento completo.

Concluiu-se que a bancada é capaz de levantar as curvas propostas e que a transformação de fase tem influência significativa sobre a emissividade do NiTi. Com os objetivos deste trabalho alcançados pode-se discorrer sobre as conclusões gerais e trabalhos futuros.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este último capítulo apresenta as conclusões que podem ser tiradas do trabalho, uma síntese dos principais resultados obtidos e sugestões para continuação do presente trabalho.

6.1 CONCLUSÕES

As conclusões deste trabalho podem ser agrupadas por segmentos. Acerca do aparato experimental fica evidente que medições precisas de emissividade só podem ser obtidas nas condições de vácuo e encarceramento por material opaco. Ensaio sem vácuo e sem uso do courino foram realizados e os resultados obtidos foram totalmente diferentes daqueles obtidos nas condições prescritas na teoria e na norma. Vale notar que os resultados obtidos sem vácuo e/ou courino divergiram da teoria e dos resultados existentes na literatura. O aparato se mostrou robusto e capaz de medir com precisão a emissividade de um corpo de prova. Os sensores infravermelhos utilizados responderam com velocidade e sensibilidade à variação de temperatura no objeto. O sistema de aquecimento mostrou-se capaz de elevar a temperatura de CPs de materiais distintos com a mesma configuração, indicando que o sistema projetado é suficiente para realizar ensaios com qualquer material metálico.

Acerca do procedimento pode - se destacar a validade do Método A da norma ASTM, mesmo com as modificações procedimentais a metodologia canônica para levantamento de uma emissividade desconhecida de um dado objeto prescrita pela norma mostrou-se eficaz. As alterações procedimentais feitas com objetivo de levantar a curva emissividade x temperatura ao invés de apenas medir a emissividade em um único ponto a uma única dada temperatura mostraram-se eficientes. As curvas obtidas estavam de acordo com a teoria.

Acerca dos resultados obtidos pode - se destacar que o resultado para o valor de emissividade da amostra de aço foi preciso e em concordância com a teoria e demais resultados encontrados na literatura. A emissividade do aço foi encontrada como aproximadamente constante na faixa de temperatura experimental (20°C a 90°C) e o valor médio obtido de 0,167 está a 4,2% do valor tabelado de 0,16. Além disso, os ensaios apresentaram precisão de 1%.

Os resultados obtidos para a liga de NiTi mostram que fora da faixa de temperaturas de transformação de fase o NiTi se comporta de modo semelhante a materiais metálicos convencionais nessa faixa de temperatura. Além disso, foi possível confirmar a hipótese de que a transformação de fase influi na emissividade da liga. Observou-se que durante a transformação de fase há uma queda abrupta no valor da emissividade e que, findada a transformação, a emissividade tende a voltar aos valores originais de emissividade. A variação da emissividade foi de 23,4%, que corresponde a uma

variação de 7% para o valor da temperatura, sendo que a liga está mais quente que o medido sem correção da emissividade. A superposição de curvas mais uma vez reforça a precisão do aparato e procedimento utilizados, a precisão dos resultados foi de 2%. Infelizmente, não foi possível testar a hipótese histerética da emissividade da liga por limitações do aparato.

De modo geral pode-se dizer que tanto o aparato projetado e construído quanto o procedimento descrito e definido são confiáveis e robustos para se realizar os ensaios propostos. A emissividade do aço foi estimada e validada comparando o resultado obtido com aquele existente na literatura e a emissividade da liga de NiTi foi medida e foi possível confirmar a hipótese de influência da transformação de fase no valor da emissividade bem como de caracterizar a forma dessa influência.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de continuação deste trabalho pode-se propor adaptar o aparato para que permita não só o aquecimento de CPs, mas também o seu resfriamento. Isto tornaria possível estudar a hipótese histerética da variação de emissividade numa liga de SMA.

Provavelmente, o melhor caminho a se tomar é utilizar o efeito Peltier para o resfriamento. O efeito Peltier é o efeito contrário do efeito Seebeck encontrado em termopares. Em pastilhas de efeito Peltier é possível retirar calor de um objeto por meio da aplicação de tensões elétricas nos terminais da pastilha. Uma vez que se tem um sistema de potência instalado na bancada atual, talvez seja possível adaptá-lo para ser usado no efeito Peltier.

Outra sugestão é idealizar uma forma de ajustar a emissividade do sensor 2 de maneira automática. Existem dispositivos capazes de corrigir a emissividade de um sensor infravermelho de maneira autônoma e computadorizada como o mostrado na Figura 6.1.

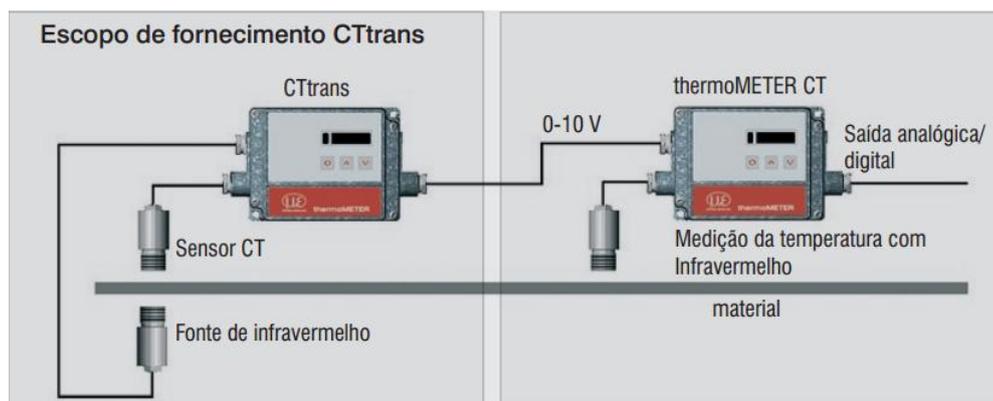


Figura 6.1 – Medidor de emissividade da micro-epsilon[23].

Cabe saber se é possível adquirir os dados de cada correção efetuada. Se for possível, vale alterar o modo de aquisição dos dados de emissividade da presente bancada para este modo.

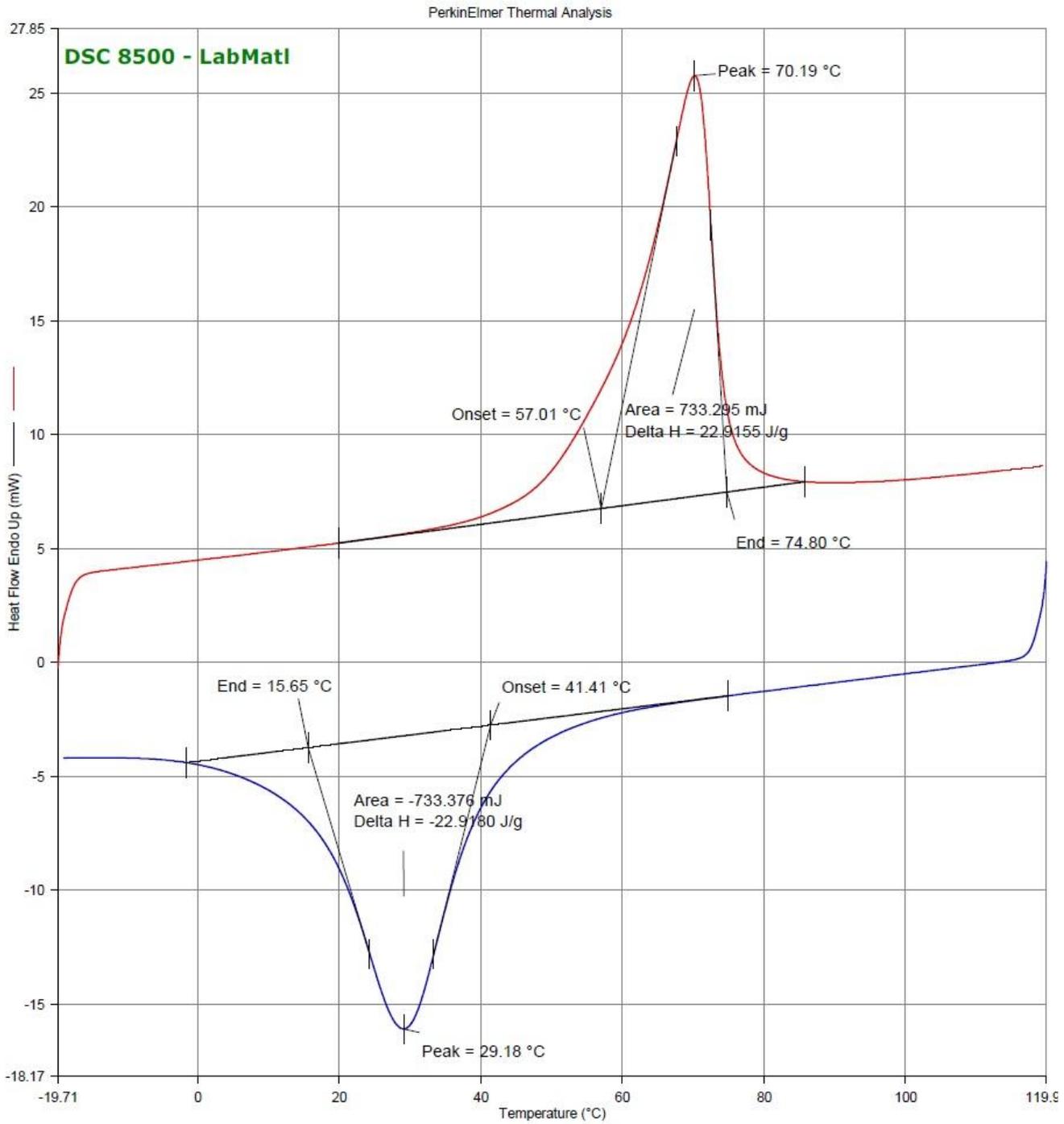
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://www.stanford.edu/~richlin1/sma/sma.html>, acessado em Julho/2013.
- [2] DUCOS, P. C. D., “Transformações de fase de ligas Níquel-Titânio para ortodontia”, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.
- [3] PETRINI, L., MIGLIAVACCA, F., “Biomedical Applications of Shape Memory Alloys”, *Journal of Metallurgy*, vol. 2011, Article ID 501483, 15 pages, 2011. doi:10.1155/2011/501483.
- [4] http://depts.washington.edu/matseed/mse_resources/Webpage/Memory%20metals/applications_for_shape_memory_al.htm, acessado em Julho/2013.
- [5] MA, H., “Thermal Modeling of Shape Memory Alloy Wire Actuators for Automotive Applications”, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2010.
- [6] FERNANDES, F. M. B., “Ligas com memória de forma”, Universidade Nova de Lisboa, Departamento de ciência dos Materiais, Lisboa, Portugal, 2003.
- [7] KNEWITZ, F. L., “Estudo Comparativo de Amostras de NiTi produzidas por Metalurgia do Pó”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2009.
- [8] BOLLER, C., “Shape Memory Alloys – Their Challenge to Contribute to Smart Structures”, DaimlerChrysler Aerospace, Military Aircraft; D-81663, Munique, Alemanha.
- [9] STOECKEL, D., “The Shape Memory Effect – Phenomenon, Alloys and Applications”, NDC – Nitinol Devices & Components, Inc., Fremont, California, EUA, 1995.
- [10] DA SILVA, E. P., “Fenomenologia das Ligas com Memória de Forma: Aspectos Microestruturais”, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, Brasil, 2011.
- [11] 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.
- [12] DE AMORIM, A. B. F., CARRIJO, F. B., PERILLO, P. S. C., LINHARES, T. M., ARAÚJO, V. H., BORGES, W. A., “Conformação de Perfis Aerodinâmicos através do uso de SMA”, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2011.
- [13] DA SILVA, E. P., “Fenomenologia das Ligas com Memória de Forma: Comportamento Termomecânico”, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, Brasil, 2011.
- [14] <http://smart.tamu.edu/overview/smaintro/detailed/detailed.html>, acessado em Agosto/2013.
- [15] 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.
- [16] INCROPERA *et al.*, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, 6ª edição, ed. John Wiley & Sons, 2007.
- [17] INFRATEMP, “Termometria Infravermelha – Teoria Básica”, Infratemp, 1ª Revisão, 2010.
- [18] RUSZCZYK, L. V. A., “Metodologia Experimental para avaliação da emissividade do aço inoxidável CA-6NM e do metal de deposição 410 NIMO em altas temperaturas”, UnB – Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, Brasil, 2012.
- [19] NUSSENZVEIG, H. M., “Curso de Física Básica, vol. 2 – Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor”, 4ª edição, 3ª reimpressão, ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 2006.
- [20] JIS A 1423, “Japanese Industrial Standard, Simplified test method for emissivity by Infrared Radio Meter”, JIS, 2013.
- [21] ASTM E1933-99a, “American Society for Testing and Materials, Standard test methods for measuring and compensating for emissivity using Infrared imaging radiometers”, ASTM, 2010.
- [22] MICRO-EPSILON, “Operation Manual – thermoMETER CT”, micro-epsilon messtechnik, Ortenburg, Alemanha, 2013.
- [23] MICRO-EPSILON, “ThermoMETER CTrans Operation Manual”, micro-epsilon messtechnik, Ortenburg, Alemanha, 2013.

ANEXOS

		Pág.
Anexo I	DSC da liga de NiTi	77

ANEXO I: DSC da liga de NiTi



6/1/2013 3:11:13 PM

- | | |
|--|--|
| 1) Hold for 1.0 min at -20.00°C | 5) Hold for 3.0 min at -20.00°C |
| 2) Heat from -20.00°C to 120.00°C at 40.00°C/min | 6) Heat from -20.00°C to 120.00°C at 20.00°C/min |
| 3) Hold for 1.0 min at 120.00°C | 7) Hold for 1.0 min at 120.00°C |
| 4) Cool from 120.00°C to -20.00°C at 40.00°C/min | 8) Cool from 120.00°C to -20.00°C at 20.00°C/min |