

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA  
MEDIÇÃO DE EMISSIVIDADE**

por

Aryston Luiz Perin

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 20 de janeiro de 2009

# DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DE EMISSIVIDADE

por

Aryston Luiz Perin  
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia, Ciências Térmicas e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França (PROMEC / UFRGS)

Prof. Dr. Milton Antonio Zaro ( IBTEC )

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer (PROMEC / UFRGS)

Prof. Dr. Horacio Vielmo  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 20 de janeiro de 2009

## ABERTURA

“... Antes do compromisso, há hesitação, a oportunidade de recuar, uma ineficácia permanente. Em todo o ato de iniciativa (e de criação), há uma verdade elementar cujo desconhecido destrói muitas idéias e planos esplêndidos. No momento em que nos comprometemos de fato, a Providência também age. Ocorre toda espécie de coisas que de outro modo nunca ocorreriam. Toda uma cadeia de eventos emana da decisão, fazendo vir em nosso favor todo tipo de encontros, de incidentes e de apoio material imprevistos, que ninguém poderia sonhar que surgiriam em seu caminho. Começa tudo o que possas fazer, ou que sonhas fazer. A ousadia traz em si o gênio, o poder e a magia ...” (Goethe)

## AGRADECIMENTOS

Ao meu professor e orientador Dr. Arno Krenzinger pelos conhecimentos recebidos, pela paciência, incentivo e constante dedicação para que este trabalho tivesse um excelente resultado.

Ao Eng. César W. M. Prieb pela importante colaboração no desenvolvimento do trabalho experimental.

Aos professores da Comissão de Avaliação por seus valiosos comentários e sugestões, que ajudaram a enriquecer este trabalho.

A todos meus professores, pelos quais tenho muito respeito e gratidão pelos conhecimentos recebidos.

A todos os funcionários da UFRGS, em especial ao secretário do PROMEC, Sr. Paulo Kutter pelo espírito de colaboração.

Aos meus colegas de laboratório por seus comentários e sugestões.

A minha família pelo apoio e pelas horas de convívio e lazer suprimidas.

E a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

### DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DE EMISSIVIDADE

Este trabalho apresenta a metodologia empregada para desenvolvimento e utilização de um equipamento para medir valores de emissividade hemisférica. O referido equipamento permite efetuar simultaneamente medidas de emissividade através do método calorimétrico e do método radiométrico.

O calorímetro mede o fluxo de calor entre duas superfícies paralelas e horizontais, onde a superfície superior é aquecida por uma fonte de corrente elétrica de alta estabilidade. As temperaturas das duas superfícies são determinadas quando o sistema atinge o equilíbrio térmico. A superfície aquecida é protegida por uma guarda térmica fazendo com que toda a potência elétrica seja dissipada à superfície inferior, que por sua vez é refrigerada com um sistema que utiliza pastilhas Peltier. O fluxo de calor é medido e seu valor é utilizado em uma equação onde as emissividades de ambas as superfícies são participantes.

O radiômetro utiliza sensores detectores térmicos que convertem em sinal elétrico o efeito de aquecimento decorrente da incidência deste fluxo de calor radiante entre as duas superfícies.

A partir de experimentos com superfícies de emissividades conhecidas, parâmetros fixos do equipamento foram determinados estando o mesmo apto a medir superfícies com valores de emissividade desconhecidos.

O trabalho analisa também os erros experimentais intrínsecos do instrumento.

Palavras chave: Emissividade, emitância, calorímetro, radiômetro, guarda quente.

## ABSTRACT

### DEVELOPMENT OF AN EQUIPAMENT TO EMISSIVITY MEASUREMENT

This work presents the methodology used for development and use of an equipment to measure values of hemispherical emissivity. The equipment allows to make emissivity measurements simultaneously through the calorimetric method and of the radiometric method.

The calorimeter measures the heat transfer between two parallel and horizontal surfaces, where the superior surface is heated up by a source of electric current of high sustainability. The temperatures of the two surfaces are determined when the system reaches the thermal equilibrium. The heated surface is protected by a thermal guard, wich makes all the eletrical power to be dissipated towards the inferior surface that is cooled by a Peltier system. The heat flux is measured and its value is used in an equation where the emissividades of both surfaces are important.

The radiometer uses thermal detectors that convert in electric sign, the heating effect due to the incidence of this radiant heat flux between the two surfaces.

Starting from experiments with surfaces of known emissivity, fixed parameters of the equipment were determined being the same capable to measure surfaces with unknown emissivity values.

The work also analyzes the experimental intrinsic errors of the apparratus.

Keywords: Emissivity, emittance, calorimeter, radiometric, guarded hot

## ÍNDICE

	Pag.
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	2
1.2. Objetivo	2
1.3. Escopo e organização desta dissertação	3
2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE RADIAÇÃO TÉRMICA	5
2.1. Espectro de radiação eletromagnética	5
2.2. Intensidade de radiação	6
2.2.1. Definições	6
2.3. Radiação do corpo negro	8
2.3.1. Distribuição de Planck	8
2.3.2. Lei do deslocamento de Wien	9
2.3.3. Lei de Stefan-Boltzmann	10
2.3.4. Produção experimental de um corpo negro	10
3. DEFINIÇÃO DE PROPRIEDADES RADIANTES DE MATERIAIS	12
3.1. Emissividade	12
3.2. Absorção, reflexão e transmissão	14
3.2.1. Absortividade	15
3.2.2. Refletividade	16
3.2.3. Transmissividade	17
3.3. Lei de Kirchhoff	18
3.4. Superfícies difusas, cinzas e opacas	18
4. TROCA DE RADIAÇÃO ENTRE SUPERFÍCIES	20
4.1. Troca de radiação do corpo negro	22
4.2. Troca de radiação em cavidade radiante fechada	23
4.2.1. Método do circuito elétrico equivalente para solução de cavidade radiante	24
4.2.1.1. Cavidade fechada com superfície reirradiante	25
4.3. Transferência de calor combinada	26

	Pag.
5. MÉTODOS EXPERIMENTAIS PARA MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE	28
5.1. Radiômetro	28
5.1.1. Simulação de corpo negro na amostra	30
5.1.2. Amostra com temperatura conhecida	31
5.2. Sensor de fluxo radiante tipo dupla face	33
5.3. Calorímetro tipo cavidade	34
5.4. Medição de emissividade espectral	38
5.5. Medição de refletividade	40
5.5.1. Refletômetro hohlraum	41
5.5.2. Refletômetro esfera integradora	42
6. PROJETO DO EXPERIMENTO	44
6.1. Calorímetro	45
6.2. Componentes do sistema de controle e aquisição de dados	50
6.2.1. Fontes de energia	51
6.2.2. Sensores	52
6.2.2.1. Sensores de temperatura	52
6.2.2.1.1. Aferição dos sensores de temperatura	53
6.2.2.2. Sensores de corrente elétrica	55
6.2.2.3. Sensores de fluxo de calor	56
6.2.2.3.1. Sensores de fluxo de calor por condução	56
6.2.2.3.2. Sensores de fluxo de calor por radiação	57
6.2.3. Sistema de controle de temperatura	60
6.2.4. Multímetro e interface multiplexada	61
6.2.5. Computador e programa supervisor	62
6.3. Fluxos de energia e princípios do calorímetro	63
6.3.1. Dimensões e propriedades físicas dos componentes do equipamento	65
6.4. Modelo matemático desenvolvido	67
6.4.1. Modelo matemático para o método calorimétrico	68
6.4.2. Modelo matemático para o método radiométrico	71



	Pag.
7. TRABALHO EXPERIMENTAL	75
7.1. Seleção e preparação das amostras	75
7.2. Medições para calibração do dispositivo	75
7.2.1. Amostras de referência utilizadas na calibração	75
7.2.2. Roteiro de calibração do dispositivo no método calorimétrico	78
7.2.3. Roteiro de calibração do dispositivo no método radiométrico	78
7.3. Medições efetuadas	79
7.4. Análise de incerteza experimental	84
7.4.1. Método utilizado para análise de incertezas	85
7.4.2. Estimativas das incertezas experimentais	85
7.4.2.1. Valores das incertezas no método calorimétrico	88
7.4.2.2. Valores das incertezas no método radiométrico	88
7.5. Resultados obtidos	89
7.5.1. Método calorimétrico	95
7.5.2. Método radiométrico	96
8. CONCLUSÕES	98
8.1. Sugestões para futuros trabalhos	101
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
10. ANEXOS	107
A1. Valores de emissividade do vidro e do alumínio	107
A2. Efeito cavidade para aumento de emissividade	112

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
$\alpha$	Absortividade	adimensional
$\varepsilon$	Emissividade	adimensional
$\rho$	Refletividade	adimensional
$\tau$	Transmissividade	adimensional
$\lambda$	Comprimento de onda	[ $\mu\text{m}$ ]
$\pi$	Constante trigonométrica Pi = 3,141592654	adimensional
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,6704 \times 10^{-8}$	[W/(m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> )]
$\Delta V$	Diferença de tensão elétrica	[mV]
$A$	Área	[ m <sup>2</sup> ]
$c$	Velocidade da luz no meio	[m/s]
$c_0$	Velocidade da luz no vácuo = $2,998 \times 10^8$	[m/s]
$C1$	Constante de radiação = $h \cdot c_0^2 = 0,59552137 \times 10^8$	[W. $\mu\text{m}^4$ /(m <sup>2</sup> .sr)]
$C2$	Constante de radiação = $h \cdot c_0/k = 14,387752$	[ $\mu\text{m} \cdot \text{K}$ ]
$C3$	Constante de radiação = 2897,7686	[ $\mu\text{m} \cdot \text{K}$ ]
$c_A$	Calor específico da amostra	[J/(kg.K)]
$d\omega$	Ângulo sólido	[sr] esterorradiano
$E$	Poder emissivo radiante	[W/m <sup>2</sup> ]
$E_b$	Poder emissivo radiante do corpo negro	[W/m <sup>2</sup> ]
$E_{\lambda,b}$	Poder emissivo radiante espectral do corpo negro	[W/(m <sup>2</sup> . $\mu\text{m}$ )]
$F_{i,j}$	Fator de forma entre superfícies "i" e "j"	Adimensional
$G$	Irradiação	[W/m <sup>2</sup> ]
$H$	Constante de Planck = $6,62606876 \times 10^{-34}$	[J.s]
$I$	Corrente elétrica,	[A]
$I$	Intensidade de radiação	[W/(m <sup>2</sup> .sr)]
$I_b$	Intensidade de radiação total associada a emissão do corpo negro	[W/(m <sup>2</sup> .sr)]
$I_{\lambda,b}$	Intensidade de radiação espectral associada a emissão do corpo negro	[W/(m <sup>2</sup> .sr. $\mu\text{m}$ )]
$I_\lambda$	Intensidade de radiação espectral	[W/(m <sup>2</sup> .sr. $\mu\text{m}$ )]

$J$	Radiosidade	[W/m <sup>2</sup> ]
$K$	Constante de Boltzmann = $1,3806503 \times 10^{-23}$	[J/K]
$K$	Condutividade térmica	[W/(m.K)]
$L$	Comprimento	[ m ]
$m_A$	Massa da amostra	[kg]
$P$	Potência elétrica	[W]
$Paq$	Potência elétrica de aquecimento do calorímetro	[W]
$Q$	Energia térmica (calor)	[ J ]
$q$	Taxa de transferência de energia (potência térmica)	[W]
$q''$	Fluxo de calor (taxa de transferência de energia por unidade de área)	[W/m <sup>2</sup> ]
$R$	Resistência térmica	[1/m <sup>2</sup> ]
$T$	Temperatura	[K] ou [°C]
$UA$	Coefficiente global de transferência de calor	[W/K]
$V$	Tensão elétrica	[V]
$V_{SA}$	Tensão elétrica do sensor radiométrico revestido de alumínio	[mV]
$V_{SP}$	Tensão elétrica do sensor radiométrico revestido de preto	[mV]
$w_m$	Incerteza do mensurando "m"	Conforme mensurando

## LISTA DE SUB-ÍNDICES

Subíndice	Descrição
$1, 2, R$	Referente as superfícies do calorímetro 1, 2 e R, respectivamente
$A$	Referente a amostra
$abs, ref, tr$	Absorvida, refletida, transmitida
$b$	Referente ao corpo negro
$i, j$	Referente a superfícies genéricas “i”, “j”, respectivamente.
$n$	Normal total
$SA$	Referente ao sensor radiométrico revestido de alumínio
$SP$	Referente ao sensor radiométrico revestido de preto
$\lambda$	Espectral
$\theta, \varphi$	Direcional, angular (ângulos $\theta, \varphi$ )

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descrição	Pag.
Figura 2.1.	Espectro da radiação eletromagnética (Incropera, DeWitt, 2003)	6
Figura 2.2.	Ângulo sólido subtendido por $dA_n$ em um ponto $dA_1$ em um sistema de coordenadas esféricas (Incropera, DeWitt, 2003)	7
Figura 2.3	Poder emissivo espectral do corpo negro (adaptado de Incropera, DeWitt, 2003)	9
Figura 2.4.	Cavidade usada para produzir uma superfície corpo negro (adaptado de Siegel, 2002)	11
Figura 3.1.	Processos de absorção, reflexão, e transmissão associados com um meio semitransparente	14
Figura 3.2.	Reflexões difusa e especular	17
Figura 4.1.	Fator de forma para discos paralelos coaxiais	21
Figura 4.2.	Resistência superficial a radiação	24
Figura 4.3.	Cavidade de três superfícies com uma superfície reirradiante (a) esquema (b) representação do circuito térmico equivalente	25
Figura 4.4.	Esquema com modos de transferência de calor	26
Figura 5.1	Radiômetro típico (a) Vista interna, (b) Detalhe dos elementos sensores; fabricante Honeywell (Holman, 2001).	29
Figura 5.2	Dispositivo para medição de emissividade normal apresentado por Snyder, Gier, Dunkle em 1955, (a) montagem geral, (b) sensor receptor de radiação (adaptado de Holman, 2001)	32
Figura 5.3	Dispositivo para medição de emissividade (Kern, 1980)	33
Figura 5.4.	Esquema de sistema para medida calorimétrica da emissividade total (adaptado de Wiebelt, 1966)	35
Figura 5.5.	Calorímetro utilizado na determinação de emissividade hemisférica de amostras tubulares (Krenzinger, 1979)	36
Figura 5.6.	Aparato para medição de emissividade total hemisférica de superfícies de 20 a 1400 °C,(a)esquema, (b)foto do dispositivo (adaptado de ASTM C835-95).	37
Figura 5.7.	Aparato portátil comercial para medição de emissividade de materiais. (a) Esquema, (b) foto do dispositivo (adaptado de ASTM C1371-97).	39
Figura 5.8.	Sistema para medida da emissividade espectral (adaptado de Wiebelt, 1966)	40

	Pag.
Figura 5.9. Esquema de um refletômetro hohlraum para medição de refletividade angular hemisférica espectral (adaptado de Duffie, 1980).	41
Figura 5.10. Esquema de um refletômetro esfera integradora para medição de refletividade angular hemisférica espectral. (a) vista lateral, (b) vista superior (adaptado de Wiebelt, 1966).	42
Figura 5.11. Esquema de um refletômetro esfera integradora com detalhe da montagem da amostra (adaptado de Holman, 2001).	43
Figura 6.1. Vista do bloco quente emissor, e respectiva blindagem térmica antes da montagem.	46
Figura 6.2. Vista da placa fria (a) pastilhas Peltier distribuídas sobre dissipador e conectadas em série, (b) mesa refrigerada com placa fria de alumínio instalada.	47
Figura 6.3. Vista em corte do calorímetro com dimensões básicas	47
Figura 6.4. Calorímetro (a) vista geral; (b) vista geral em corte; (c) corte em detalhes – (1) superfície negra do bloco quente, (2) superfície da amostra (a ser medida emissividade, (R) superfície reirradiante, (M) amostra, (C) superfície da placa fria (junto amostra), (6) superfície placa fria (junto a célula Peltier), (7) superfície bloco quente (junto a aquecedor), (A) ambiente externo, (H) aquecedor elétrico primário, (B) aquecedor elétrico secundário (blindagem térmica), (D) superfície da célula Peltier (junto a dissipador), (P) célula Peltier, (V) dissipador térmico aletado com ventilador, (I) isolamento térmico, (S) Sensores detectores térmicos radiométricos (pastilha Peltier).	48
Figura 6.5. Calorímetro (a) vista explodida antes da montagem, (b) vista externa montado, (c) vista aberto com amostra de alumínio	49
Figura 6.6. Esquema do sistema auxiliar para instrumentação, controle e aquisição de dados	50
Figura 6.7. Banho termostático com controle eletrônico de temperatura para aferição de sensores de temperatura, fabricante Lauda (a) aberto desligado, (b) bloco de alumínio, (c) fechado em operação, termômetro adicional de mercúrio, sistema de aquisição de dados, calibrando sensores dentro de bloco de alumínio, dentro de banho maria	54

	Pag.
Figura 6.8. Esquema de ligação elétrica para medição de potência (tensão e corrente elétrica)	55
Figura 6.9. Fluxímetro de calor (a) vista externa montado, (b) vista interna desmontado (disco plástico e célula Peltier)	57
Figura 6.10. Sensores térmicos de radiação: esquema de ligação elétrica para saída de tensão diferencial	58
Figura 6.11. Sensores térmicos radiométricos tipo termopilha (a) pastilhas Peltier sem revestimento, (b) um recoberto com alumínio, outro recoberto com tinta preta, montados internamente ao calorímetro colados sobre a superfície 1 (superfície quente emissora)	58
Figura 6.12. Sensores térmicos de radiação montados no interior da cavidade radiante do calorímetro (a) vista superior, (b) vista lateral 1, (c) vista lateral 2	59
Figura 6.13. Controlador eletrônico de temperatura	60
Figura 6.14. Sistema de aquisição de dados (a) multímetro com interface multiplexada, (b) cartão de conexões da placa de aquisição de dados	61
Figura 6.15. Computador supervisor e fontes elétricas durante medições	62
Figura 6.16. Esquema do calorímetro: fluxos de energia térmica e elétrica	63
Figura 6.17. Fluxos parciais de energia – apenas na cavidade cilíndrica – parâmetros funcionais utilizados no modelo matemático	64
Figura 6.18. Modelo do calorímetro, representação do circuito térmico correspondente, (a) circuito completo; (b) circuito simplificado pelo fator-UAG determinado experimentalmente (bypass indesejável)	66
Figura 6.19. Gráfico da equação geral do medidor de emissividade pelo método radiométrico	74
Figura 7.1. Gráfico " $\Delta V \times (T_1^4 - T_2^4)$ " com resultados experimentais para amostras de referência: (a) vidro comum $\epsilon_2 \sim 0,84$ e alumínio $\epsilon_2 \sim 0,05$ ; (b) vista ampliada somente para amostra alumínio $\epsilon_2 \sim 0,05$	82
Figura 7.2. Gráfico teórico " $\Delta V \times (T_1^4 - T_2^4)$ ", para previsão de emissividade de amostras diversas	83
Figura 7.3. Gráfico " $\Delta V \times (T_1^4 - T_2^4)$ " com resultados experimentais para amostras de referência: (a) vidro comum $\epsilon_2 \sim 0,84$ , alumínio $\epsilon_2 \sim 0,05$ condensando umidade do ar na etapa de aquecimento, atingindo $\epsilon_2$ ALUMINIO CONDENSADO $\sim 0,6$	83

	Pag.
Figura 7.4. Parcelas de fluxo de calor no interior da cavidade, conforme exemplo Tabela 7.7: (E) Potência elétrica de aquecimento, (R) parcela de transferência de calor por radiação, (K) parcela de transferência de calor por condução através do ar, e (UA) a parcela de calor desviado, versus a emissividade da superfície 2 (amostra).	92
Figura 7.5. Parcelas de fluxo de calor no interior da cavidade: por condução através do ar e por radiação entre superfícies 1 e 2, versus a emissividade da superfície 2 (amostra).	96
Figura 7.6. Medições de emissividade efetuadas pelo método radiométrico com diferentes amostras.	97
Figura A1.1 Distribuição da emissividade direcional de materiais não metálicos (a) Gelo, (b) Madeira, (c) Vidro, (d) Papel, (e) Argila, (f) Cobre oxidado,(g) Alumínio oxidado (Schmidt, 1935)	108
Figura A1.2 Propriedades radiantes do vidro, na faixa espectral de 0 e 15 $\mu\text{m}$ : transmissividade (linha pontilhado), emissividade (linha contínua), refletividade (linha traço-ponto) (Raytec, 2003)	108
Figura A1.3 Refletividade espectral de um vidro claro típico (Rubin, 1985)	109
Figura A1.4 Transmissividade espectral de um vidro claro típico (Rubin, 1985)	109
Figura A1.5 Emissividade espectral de materiais metálicos (a) alumínio polido, (b) alumínio anodizado, (c) cobre polido (Sieber, 1941)	110
Figura A1.6 Distribuição da emissividade direcional de materiais metálicos: Al, Cr, Mn, Ni (Schmidt, 1935)	111
Figura A2.1 Exemplo de configuração de cavidade para aumento de emissividade aparente, conforme tabela A2.1.	113
Figura A2.2 Várias configurações de cavidades e emissividade aparente (adaptado de Sparrow, 1970)	115



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Descrição	Pag.
Tabela 6.1.	Valores da resposta da tensão de saída das fontes utilizadas, proporcionais a tensão de entrada controle.	52
Tabela 6.2	Valores típicos de erro esperado (a) para termopares com fios padrões sem seleção; (b) para termopares após calibração (adaptado de Marks, 1996).	53
Tabela 6.3.	Dimensões e propriedades termofísicas dos componentes do equipamento	65
Tabela 7.1.	Propriedades termofísicas das amostras utilizadas	76
Tabela 7.2.	Propriedades termofísicas das amostras utilizadas como referência no processo de calibração	77
Tabela 7.3.	Especificações de exatidão esperada para medidas efetuadas com o sistema de aquisição de dados Agilent 34970A, na temperatura ambiente de $23 \pm 5$ °C.	86
Tabela 7.4.	Resumo geral comparativo das medições efetuadas	90
Tabela 7.5.	Quadro comparativo de incertezas esperadas para medidas de emissividade com diferentes tipos de sensores de temperatura.	91
Tabela 7.6.	Análise de sensibilidade do efeito da variação da condutividade térmica do ar nas medidas efetuadas em amostras de alta e baixa emissividade.	91
Tabela 7.7.	Exemplo de resultados das medidas efetuadas em amostras de alta e baixa emissividade.	94
Tabela A1.1	Emissividade espectral do alumínio (Gubareff, 1960)	110
Tabela A2.1	Valores de emissividade aparente para uma cavidade cilíndrica, parcialmente coberta, com paredes isotérmicas.	113

## 1. INTRODUÇÃO

Sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios diferentes ocorre transferência de energia térmica do meio de maior temperatura para o meio de menor temperatura. É comum utilizar a expressão “transferência de calor” para denominar esta transferência de energia.

Existem três diferentes tipos de processos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Quando existe um gradiente de temperatura em um meio estacionário, que pode ser um sólido ou um fluido usa-se o termo condução para referir à transferência de calor que irá ocorrer através deste meio. Por outro lado, o termo convecção refere-se à transferência de calor que irá ocorrer entre uma superfície e um fluido em movimento quando eles se encontram em temperaturas diferentes. Um terceiro modo de transferência de calor é conhecido por radiação térmica. A radiação térmica não necessita de meio, podendo ocorrer até mesmo no vácuo, ao contrário dos outros dois processos de transferência de calor. A radiação é um mecanismo de transferência de calor extremamente importante, e no significado físico, talvez seja o mais interessante.

A radiação térmica é relevante nas mais diversas aplicações de engenharia, como em processos industriais de aquecimento, resfriamento e secagem; em métodos de conversão de energia que envolve a combustão; na conversão da energia solar em energia elétrica ou térmica; em conforto térmico ambiental.

Para projeto e análises térmicas radiantes nas mais diversas aplicações de engenharia se faz necessário o conhecimento da emissividade superficial.

A determinação da emissividade hemisférica é muitas vezes feita através de medidas óticas de refletividade e transmissividade espectral em uma ampla faixa de comprimentos de ondas e depois determinada por integração no espectro de emissão do corpo negro. Estas medidas podem trazer, como inconveniente, erros significativos, e devem ser validadas com uso de experimentos para determinar a transferência de calor por radiação entre superfícies. Vários calorímetros já utilizados para determinar a emissividade fazem uso de uma câmara com vácuo e paredes resfriadas medindo a curva de resfriamento de uma amostra em seu interior quando a principal forma de transferência de calor é a emissão de radiação da superfície da mesma amostra. Outros como no caso do presente trabalho utilizam uma blindagem térmica ao redor de uma placa quente ou de uma placa fria, garantindo em ambos os casos que o fluxo de calor seja unidirecional e obtendo em regime permanente uma medida absoluta do fluxo de calor do qual se pode extrair a emissividade.

## 1.1. Motivação

No projeto e otimização de sistemas térmicos é desejável o conhecimento das características térmicas dos materiais. O projetista espera encontrar estas propriedades radiantes na literatura técnica.

Os valores de emissividade de materiais usuais de engenharia, de procedência conhecida, ou de utilização universal, são apresentados em tabelas de propriedades dos materiais, porém para uma grande quantidade de materiais utilizados como componentes de sistemas térmicos possuem apenas valores estimados, pela falta de resultados experimentais confiáveis.

Pode-se citar ainda, como exemplo, que nos modelos matemáticos analíticos ou numéricos para análise avançada do comportamento térmico de edificações, na análise do conforto térmico no interior de ambientes, no estudo de alternativas para controle solar, cálculos de perdas térmicas em sistemas de armazenamento de energia, aplicações de energia solar ou ainda na análise de prevenção de incêndios, tem-se muitas vezes grande dificuldade para encontrar certos valores de emissividade para as superfícies de interesse, como no caso de tintas e revestimentos diversos.

As edificações possuem os mais variados tipos de materiais, com os mais diversos tipos de acabamento superficial (cerâmicas, porcelanatos, mármore, madeiras, placas de metais, pinturas, vidros, películas de controle solar, móveis, etc), sendo assim muito difícil de se encontrar tabelado na literatura os valores de emissividade de alguns materiais específicos.

Os valores representativos da emissividade apresentados na literatura podem não ser válidos para os materiais reais de interesse, pois a emissividade é fortemente dependente da temperatura e das características da superfície, como rugosidade, oxidação, etc. No caso de tintas pode-se citar a dependência ao tipo de substrato, da carga de corantes e metais, etc.

## 1.2. Objetivo

O objetivo principal deste trabalho foi de desenvolver, dimensionar, construir e avaliar um aparato experimental que permita a medição da emissividade superficial de amostras planas e opacas de materiais diversos, em temperatura próxima da temperatura ambiente ( $T \sim 300 \text{ K}$ ).

### 1.3. Escopo e organização desta dissertação

O desenvolvimento do referido equipamento baseou-se na simplicidade de construção mecânica, utilizando modelos matemáticos analíticos consolidados na literatura, para projeto, operação e avaliação do seu comportamento térmico.

O calorímetro possui superfícies com temperatura controlada, onde uma delas é a superfície da amostra de material a qual se deseja medir a emissividade superficial. O equipamento possui sensores térmicos radiométricos, sendo possível realizar experimentos para medição da emissividade simultaneamente pelo método calorimétrico e pelo método radiométrico.

No capítulo 2 apresenta-se inicialmente uma revisão de conceitos fundamentais sobre radiação térmica.

No capítulo 3 apresenta-se a definição de propriedades radiantes das superfícies dos materiais, emissividade, absorvidade, refletividade, transmissividade, e suas relações.

No capítulo 4 apresentam-se conceitos básicos de transferência de calor adotados para a avaliação de troca de radiação entre as superfícies de uma cavidade. Utiliza-se para isto um método particular para cavidade fechada com três superfícies, onde uma das superfícies é adiabática. Este método, baseado na análise de circuitos e no balanço dos fluxos de energia, proporciona boa visualização dos conceitos físicos da troca de calor por radiação entre superfícies e possui equacionamento matemático simples e direto, permitindo fácil acoplamento com equacionamento analítico da transferência de calor por condução unidirecional no ar no interior da cavidade.

No capítulo 5 apresenta-se uma revisão sobre métodos experimentais e dispositivos para medição de emissividade, disponíveis na literatura. Apresentam-se alguns dispositivos básicos discutindo sobre suas características, modos de operação, aplicações e limitações.

No capítulo 6 apresenta-se o projeto do equipamento experimental desenvolvido e seus componentes, discutindo seus princípios de funcionamento e suas potenciais aplicações. São apresentadas as características construtivas, as propriedades dos componentes, os critérios e considerações utilizadas na modelagem matemática do equipamento desenvolvido. Apresenta-se também o conjunto de componentes e sensores utilizados na instrumentação do referido equipamento medidor de emissividade. A partir dos conceitos apresentados é proposto o modelo matemático para o equipamento desenvolvido.

No capítulo 7 apresentam-se as etapas do trabalho experimental realizado. Inicialmente são realizados experimentos para determinação de constantes experimentais de calibração, validação do modelo matemático e observação do comportamento do equipamento.

Após a calibração do equipamento desenvolvido, medidas de emissividade são realizadas em diversas amostras com temperatura próxima da temperatura ambiente. Os resultados são compilados e apresentados, para comparação com valores disponíveis na literatura.

Na seqüência é feita uma análise sobre erros experimentais intrínsecos do instrumento, e sobre valores de incertezas esperadas para os resultados obtidos.

No capítulo 8 o trabalho é finalizado apresentando considerações e conclusões sobre o equipamento desenvolvido, sugerindo ainda trabalhos que poderiam ser efetuados, dando seguimento na utilização e aperfeiçoamento do referido equipamento.

No anexo A1 são apresentadas informações complementares sobre os materiais das amostras padrões utilizados neste trabalho e seus respectivos valores de emissividade, considerando características espectrais, direcionais.

No anexo A2 são apresentados artifícios que podem ser utilizados para aumento da emissividade aparente.

## 2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE RADIAÇÃO TÉRMICA

Radiação eletromagnética é continuamente emitida por todas as substâncias em razão da agitação atômica e molecular combinada com a sua energia interna. No equilíbrio, a energia interna é proporcional a temperatura do material.

Radiação térmica pode ser definida como a energia eletromagnética radiante emitida por um meio ou superfície em virtude da sua temperatura, sempre que esta estiver acima de 0 K.

A energia radiante emitida por um corpo pode ser transferida à superfície de um outro corpo distante, sem requerer um meio entre estes. O fluxo radiante depende da forma, do tamanho, e principalmente da temperatura do corpo. A energia radiante incidente sobre uma superfície poderá ser absorvida, refletida, transmitida ou espalhada em várias direções.

Todos os materiais continuamente emitem e absorvem ondas eletromagnéticas, ou fótons, respectivamente diminuindo ou aumentando seus níveis de energia.

Para gases e sólidos semitransparentes a emissão é um fenômeno volumétrico, isto é, a radiação proveniente de um volume finito de matéria é o efeito integrado da emissão local através do volume.

Na maioria dos sólidos e líquidos, a radiação emitida por átomos internos é fortemente absorvida pelos átomos adjacentes. Assim sendo, a radiação emitida por um sólido ou por um líquido se originam de átomos que se encontram a uma distância não superior a 1  $\mu\text{m}$  da superfície exposta. É por esta razão que a emissão de um sólido ou líquido no interior de um gás ou vácuo é visto como um fenômeno de superfície.

Existe grande dificuldade em especificar valores exatos para propriedades radiantes. Para materiais sólidos as propriedades dependem de muitas variáveis, como rugosidade superficial, grau de polimento, pureza do material, espessura de revestimento, temperatura, comprimento de onda da radiação, ângulo ao qual o fluxo deixa a superfície. Para misturas gasosas, as propriedades dependem do comprimento de onda de maneira muito irregular, e são função da pressão, da temperatura e da composição da mistura gasosa.

### 2.1. Espectro de radiação eletromagnética

Uma teoria descreve a radiação como a propagação de um conjunto de partículas denominadas fótons ou quanta. Alternativamente pode ser vista como a propagação de ondas eletromagnéticas. Em qualquer caso, se atribui a radiação térmica as propriedades padrões das

ondas, como frequência “ $\nu$ ” e comprimento de onda “ $\lambda$ ”. Para a propagação da radiação em um meio particular, estas propriedades são relacionadas por

$$\lambda = c / \nu \quad (2.1)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz no meio (para propagação no vácuo  $c = c_0 = 2,998 \times 10^8$  m/s).

Existem muitos tipos de radiação eletromagnética, a radiação térmica é apenas uma delas. O espectro eletromagnético pode ser visto na Figura 2.1. A região intermediária do espectro é denominada radiação térmica, e vai aproximadamente de comprimento de onda  $0,1 \mu\text{m}$  a  $100 \mu\text{m}$ , inclui uma parcela do ultravioleta (UV), faixa da radiação visível (de  $0,4$  a  $0,7 \mu\text{m}$ ), e infravermelha (IV).

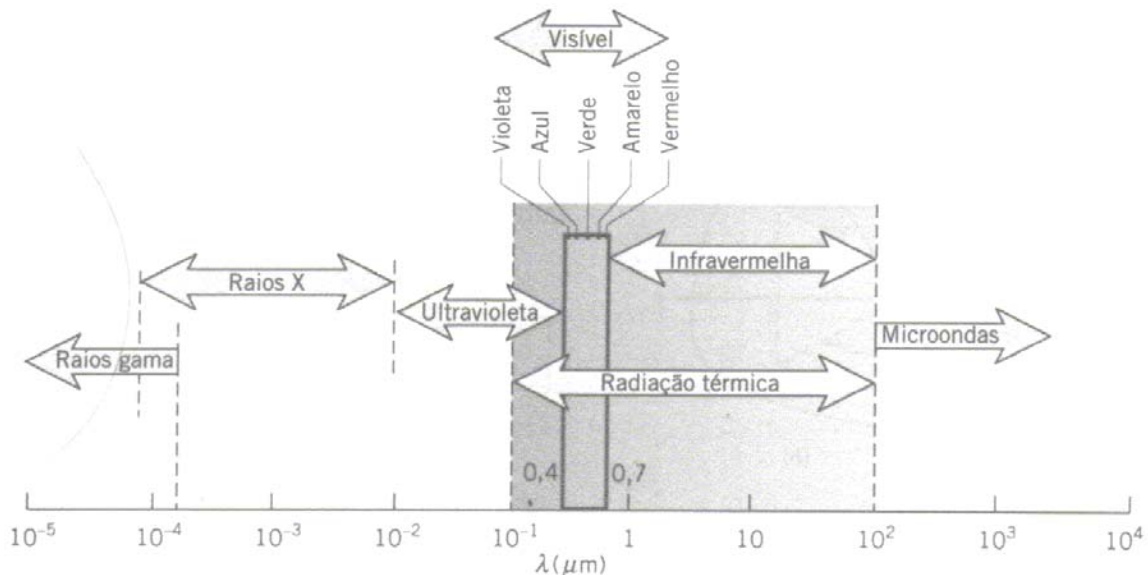


Figura 2.1. Espectro da radiação eletromagnética (Incropera, DeWitt, 2003)

## 2.2. Intensidade de radiação

### 2.2.1. Definições

A radiação emitida em todas as direções é definida em termos de intensidade. A intensidade de radiação “ $I$ ” é definida como a energia emitida por unidade de área, por unidade de tempo, para um ângulo sólido unitário, por unidade de área da superfície emissora projetada normal a direção  $\theta$ .

Para ilustrar o conceito de intensidade, seja “ $dq/dA_r$ ” a taxa de energia radiante, por unidade de tempo, e por unidade de área superficial, que passa dentro do ângulo sólido diferencial representado por “ $d\omega$ ”, inclinado um ângulo  $\theta$  em relação a normal da superfície emissora (Kreith, 1977). A intensidade é então dada por

$$I = \frac{d^2 q}{dA_n d\omega \cos \theta} \quad (2.2)$$

onde o ângulo sólido diferencial “ $d\omega$ ” é definido como a razão entre o elemento de área  $dA_n$  na esfera e o quadrado do raio da esfera . Assim sendo,

$$d\omega \equiv \frac{dA_n}{r^2} = \frac{r d\theta r \sin \theta d\phi}{r^2} \quad (2.3)$$

Substituindo e integrando no hemisfério tem-se

$$(q/A)_r = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I(\theta, \phi) \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (2.4)$$

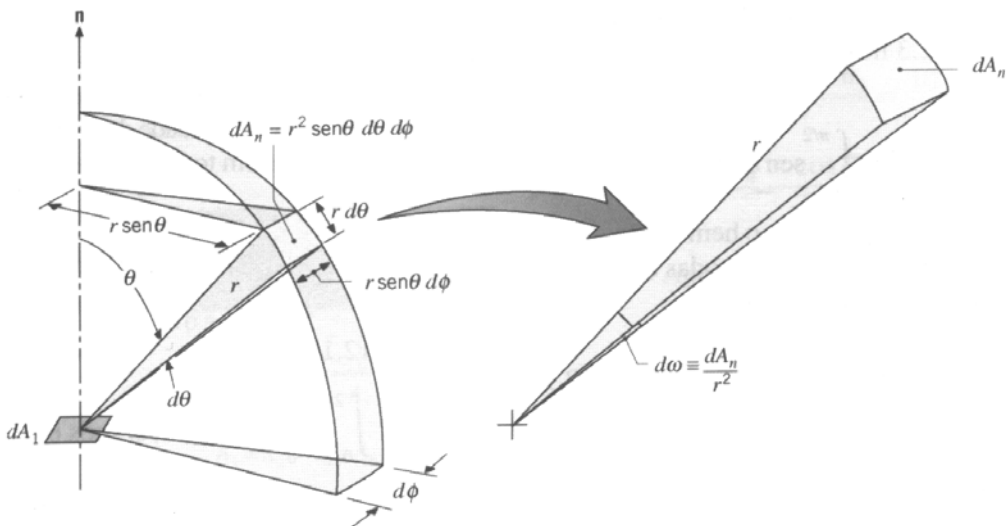


Figura 2.2. Ângulo sólido subtendido por  $dA_n$  em um ponto  $dA_1$  em um sistema de coordenadas esféricas (Incropera, DeWitt, 2003)



A intensidade pode ser classificada como a intensidade espectral “ $I_\lambda$ ” que se refere a radiação em um intervalo  $d\lambda$  ao redor de um único comprimento de onda  $\lambda$ , ou a intensidade total “ $I$ ” que se refere a radiação combinando todos os comprimentos de onda.

$$I = \int_{\lambda=0}^{\infty} I_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (2.5)$$

### 2.3. Radiação do corpo negro

O corpo negro é definido como uma superfície ideal que tem propriedades fundamentais que o tornam um padrão de comparação para os corpos radiantes reais. O corpo negro é uma superfície ideal que tem as seguintes propriedades:

- Para uma temperatura e comprimento de onda dados, nenhuma superfície pode emitir mais energia do que um corpo negro;
- Embora a radiação emitida por um corpo negro seja função do comprimento de onda e da temperatura, ela é independente da direção. Isto é, o corpo negro é um emissor difuso perfeito (o termo "difuso" é melhor explicado no item 3.4) ;
- É o melhor emissor e melhor absorvedor de energia radiante, independente do comprimento de onda e da direção, logo suas propriedades radiantes possuem o valor máximo, isto é, absorvidade  $\alpha = 1$ , emissividade  $\epsilon = 1$ .
- A intensidade total radiante (para todos os comprimentos de onda) e poder emissivo de um corpo negro em um meio com índice de refração “ $n$ ” são relacionados pela lei de Stefan-Boltzmann.

$$\pi I_b = E_b = n\sigma T^4 \quad (2.6)$$

#### 2.3.1. Distribuição de Planck

A partir da estatística quântica, Planck, 1901 (apud Siegel, 2002) obteve que o poder emissivo espectral do corpo negro “ $E_{\lambda,b}$ ” tem a seguinte forma

$$E_{\lambda,b}(\lambda,T) = \pi I_{\lambda,b}(\lambda,T) = \frac{2\pi C1}{\lambda^5 [\exp(\frac{C2}{\lambda T}) - 1]} \quad (2.7)$$

onde as constantes  $C1 = h.c_0^2 = 0,59552137 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ ,  $C2 = h.c_0/k = 14,387752 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ , a constante de Planck  $h = 6,62606876 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ , a constante de Boltzmann  $k = 1,3806503 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ , a velocidade da luz no vácuo  $c_0 = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $T$  é a temperatura absoluta em K.

A Figura 2.3 apresenta o resultado gráfico da eq. 2.7, em escala logarítmica.

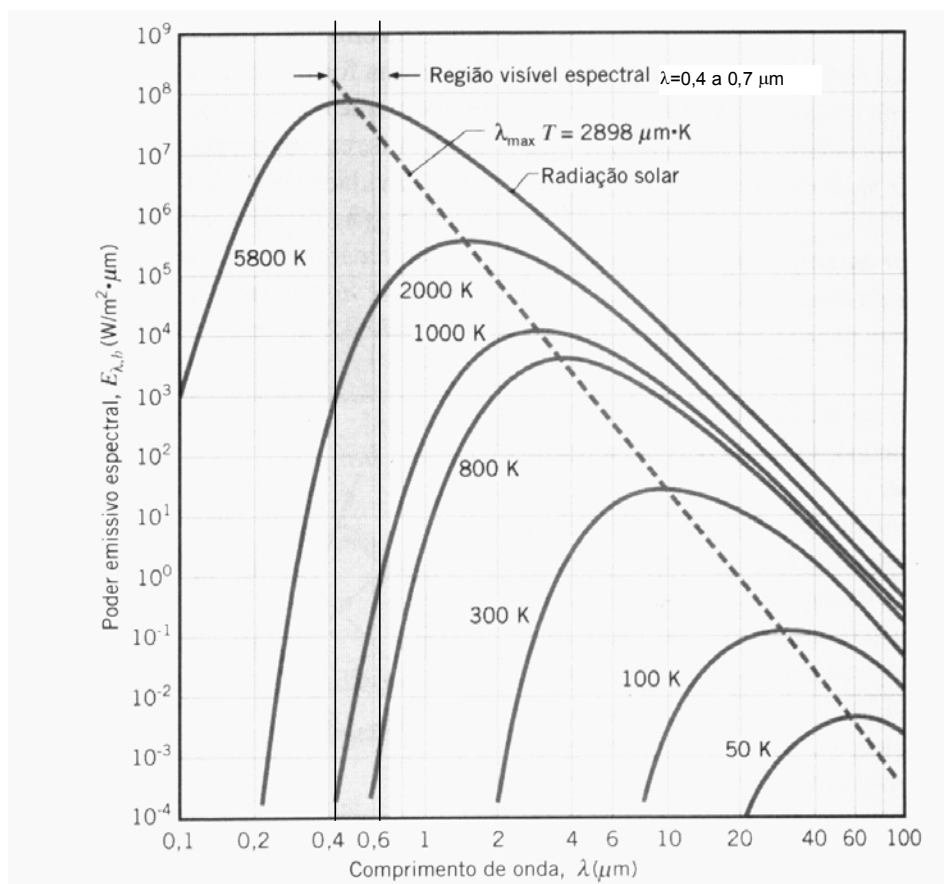


Figura 2.3. Poder emissivo espectral do corpo negro (adaptado de Incropera, DeWitt, 2003)

### 2.3.2. Lei do deslocamento de Wien

Da Figura 2.3 vê-se que a distribuição espectral do corpo negro tem um máximo, e que comprimento de onda correspondente  $\lambda_{\text{max}}$  depende da temperatura. A natureza dessa

dependência pode ser obtida pela diferenciação da eq. 2.8 em relação a  $\lambda$  igualando a zero, resultando

$$\frac{d E_{\lambda, b}(\lambda, T)}{d\lambda} = 0 \quad (2.8)$$

Desta forma, obtêm-se

$$\lambda_{\max} T = C3 \quad (2.9)$$

onde a terceira constante da radiação é  $C3 = 2897,7686 \mu\text{m.K}$ .

A eq. 2.9 é conhecida como a lei do deslocamento de Wien, e as posições dos pontos descritos são representadas graficamente por linha pontilhada na Figura 2.3.

### 2.3.3. Lei de Stefan-Boltzmann

A lei de Stefan-Boltzmann mostra que o fluxo de potência emissiva total hemisférica do corpo negro radiando no vácuo é dado por

$$E_b = \pi I_b = \int_0^{\infty} E_{\lambda, b}(\lambda) d\lambda = \pi \int_0^{\infty} I_{\lambda, b}(\lambda) d\lambda = \sigma T^4 \quad (2.10)$$

onde a constante de Stefan-Boltzmann  $\sigma = 5,6704 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K}^4)$ . O poder emissivo total  $E_b(T)$  é área sob a curva de temperatura T, na Figura 2.3. A eq. 2.10 permite calcular a radiação total emitida em todas as direções e sobre todos os comprimentos de onda a partir do conhecimento apenas da temperatura do corpo negro. Por esta emissão ser difusa, a intensidade de radiação total associada à emissão do corpo negro é

$$I_b = \frac{E_b}{\pi} \quad (2.11)$$

#### 2.3.4. Produção experimental de um corpo negro

Quando são feitas medidas experimentais de propriedades radiativas de materiais, é desejável ter uma fonte corpo negro de referência. Como um corpo negro não existe na natureza, são utilizadas técnicas especiais para aproximar estas superfícies reais a superfícies negras.

Por definição a emissividade do corpo negro é igual a 1. Um exemplo simples de simulação de um corpo negro artificial é pintar uma superfície com tinta preta fosca com alta emissividade (emissividade hemisférica total da ordem de 0,95). Outro exemplo de corpo negro artificial pode ser visto na Figura 2.4., que mostra um cilindro de metal (cobre), isolado termicamente, que tem uma cavidade cônica com revestimento interno de alta absorção, com uma pequena abertura. A cavidade considera paredes perfeitamente isotérmicas, perfeitamente isoladas, e que a abertura é infinitesimalmente pequena que não causam distúrbio no equilíbrio radiante da cavidade. Bedford, 1988 apresenta boa discussão sobre vários projetos de cavidades.

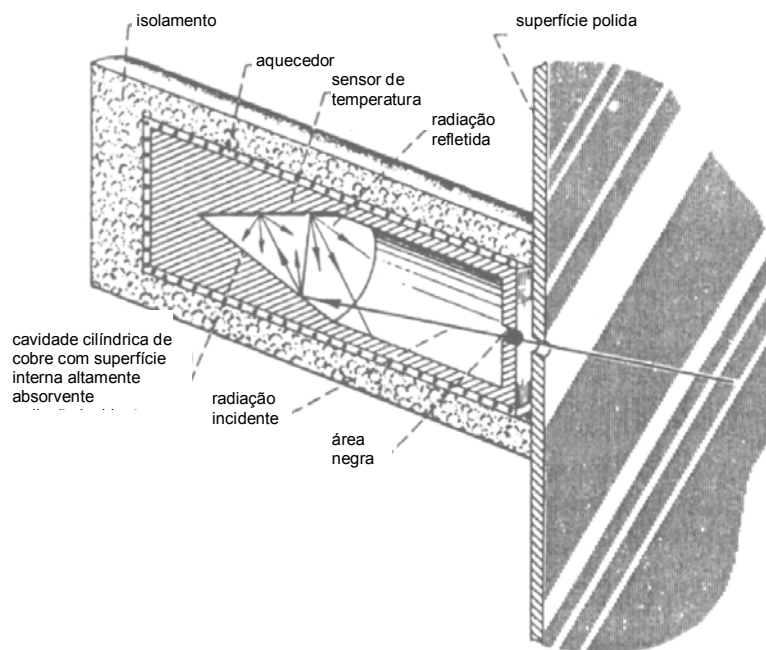


Figura 2.4. Cavidade usada para produzir uma superfície corpo negro (adaptado de Siegel, 2002)

Em aplicações onde é desejável aumentar a emissividade de alguma superfície (buscando assim aproximar a emissividade à do corpo negro) pode-se utilizar o efeito cavidade. O anexo A2 apresenta o efeito esperado para alguns tipos de geometrias de cavidades que servem de artifício para aumento de emissividade.

### 3. DEFINIÇÃO DE PROPRIEDADES RADIANTES DAS SUPERFÍCIES

A nomenclatura utilizada para propriedades radiantes de materiais varia consideravelmente na literatura. Uma questão que freqüentemente ocorre é sobre o significado das terminações “sividade” e “tância”. Alguns autores utilizam “sividade” para propriedades intrínsecas de substância puras, perfeitamente polidas, recozidas, sem tensões residuais, e utilizam “tância” para superfícies rugosas, oxidadas, ou outras características não ideais. Porém outros autores consideram que não existe significado especial quanto a estas terminações.

Neste trabalho será utilizada a seguinte nomenclatura para as propriedades radiantes de superfícies: emissividade, absorvidade, refletividade, transmissividade.

#### 3.1. Emissividade

A emissividade pode ser definida como a razão entre a energia radiante emitida por uma superfície real e a energia radiante emitida pelo corpo negro, de mesma área, nas mesmas condições de temperatura (eq. 3.1).

$$Emissividade \equiv \varepsilon = \frac{\text{Energia emitida pela superfície real}}{\text{Energia emitida pelo corpo negro}} \quad (3.1)$$

Por definição, a emissividade do corpo negro é igual a 1, para todos os comprimentos de onda.

A emissividade pode depender de alguns fatores como a temperatura do corpo, comprimento de onda da energia emitida, e o ângulo da emissão. A emissividade é freqüentemente medida experimentalmente na direção normal da superfície, e como função do comprimento de onda. Para cálculo da potência total radiante emitida por uma superfície é necessário incluir todas as direções e comprimentos de ondas.

Emissividade direcional espectral  $\varepsilon_{\lambda\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T)$  de uma superfície a temperatura  $T$  é definida como a razão entre a radiação emitida no comprimento de onda  $\lambda$  e na direção  $\theta$  e  $\varphi$  e a radiação emitida pelo corpo negro nos mesmos valores de  $T$  e  $\lambda$ .

$$\varepsilon_{\lambda\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T) = \frac{I_{\lambda}(\lambda, \theta, \varphi, T)}{I_{\lambda b}(\lambda, T)} \quad (3.2)$$

Emissividade total direcional  $\varepsilon_\theta(\theta, \varphi, T)$  de uma superfície a temperatura  $T$  é definida como a razão entre a radiação média emitida considerando (integrando) a contribuição de todos os comprimento de onda  $\lambda$  e na direção  $\theta$  e  $\varphi$ , e a radiação emitida pelo corpo negro no mesmo valor de  $T$ .

$$\varepsilon_\theta(\theta, \varphi, T) = \frac{\int_0^\infty I_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T) d\lambda}{\int_0^\infty I_{\lambda b}(\lambda, T) d\lambda} = \frac{\int_0^\infty I_\lambda(\lambda, \theta, \varphi, T) d\lambda}{\frac{\sigma T^4}{\pi}} \quad (3.3)$$

Emissividade espectral hemisférica  $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$  de uma superfície a temperatura  $T$  é definida como a razão entre a radiação média emitida no comprimento de onda  $\lambda$  considerando (integrando) a contribuição de todas as direções  $\theta$  e  $\varphi$ , e a radiação emitida pelo corpo negro nos mesmos valores de  $T$  e  $\lambda$ .

$$\varepsilon_\lambda(\lambda, T) = \frac{1}{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \varepsilon_{\lambda\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T) \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi \quad (3.4)$$

Emissividade hemisférica total  $\varepsilon(T)$  de uma superfície a temperatura  $T$  é definida como a razão entre a radiação média emitida considerando (integrando) a contribuição de todos comprimentos de onda  $\lambda$ , e as contribuições de todas as direções  $\theta$  e  $\varphi$ , e a radiação emitida pelo corpo negro na mesma temperatura.

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda(\lambda, T) E_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^\infty E_b(\lambda, T) d\lambda} \quad (3.5)$$

### 3.2. Absorção, reflexão e transmissão

Define-se irradiação espectral “ $G_\lambda$ ” ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$ ) como a taxa na qual a radiação de comprimento de onda  $\lambda$  é incidente sobre uma superfície por unidade de área da superfície e por intervalo de comprimento de onda unitário  $d\lambda$  em torno de  $\lambda$ , e irradiação total “ $G$ ” ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) engloba todas as contribuições espectrais, e pode ser calculada pela equação

$$G = \int_0^{\infty} G_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (3.6)$$

Consideram-se então os processos resultantes da interceptação desta radiação por um meio sólido (ou líquido). Na situação mais geral a irradiação interage com um meio semitransparente, tal como uma camada de água ou uma placa de vidro.

A Figura 3.1 mostra que para um componente espectral da irradiação  $G_\lambda$ , partes desta radiação podem ser absorvidas  $G_{\lambda, \text{abs}}$ , partes desta radiação podem ser refletidas  $G_{\lambda, \text{ref}}$ , partes desta radiação podem ser transmitidas  $G_{\lambda, \text{tr}}$ . A partir de um balanço de radiação no meio, segue que

$$G_\lambda = G_{\lambda, \text{abs}} + G_{\lambda, \text{ref}} + G_{\lambda, \text{tr}} \quad (3.7)$$

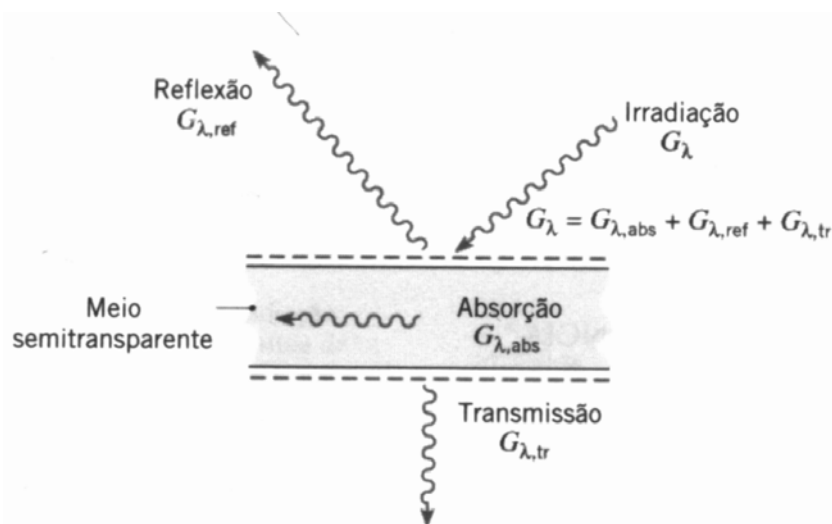


Figura 3.1. Processos de absorção, reflexão, e transmissão associados com um meio semitransparente (Incropera, DeWitt, 2003)

ou ainda, dividindo tudo pela irradiação  $G_\lambda$ , temos

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (3.8)$$

onde  $\alpha$  é a absorptividade,  $\rho$  é a refletividade,  $\tau$  é a transmissividade.

Em geral, a determinação destes componentes é complexa, dependendo das condições superior e inferior da superfície, do comprimento de onda da radiação, da composição e espessura do meio, e ainda é fortemente afetada pelos efeitos volumétricos que ocorrem no interior do meio.

### 3.2.1. Absortividade

A absorptividade é definida como a fração de energia incidente na superfície de um corpo que é absorvida por este corpo.

$$\text{Absortividade} \equiv \alpha = \frac{\text{Energia absorvida pelo corpo}}{\text{Energia incidente no corpo}} \quad (3.9)$$

A absorptividade do corpo negro é igual a 1, para todos os comprimentos de onda.

A radiação incidente depende das condições radiantes da fonte de energia incidente. A distribuição espectral da radiação incidente é independente da temperatura ou natureza física da superfície absorvente a menos que a radiação emitida pela superfície é refletida de volta para a superfície.

Absortividade hemisférica total  $\alpha$ , é definida como fração da irradiação total absorvida por uma superfície. Representa a média total integrada sobre a direção e o comprimento de onda.

$$\alpha \equiv \frac{G_{\text{absorvida}}}{G} \quad (3.10)$$

ou ainda

$$\alpha(T) = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda(\lambda, T) G_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda(\lambda) d\lambda} \quad (3.11)$$



### 3.2.2. Refletividade

A refletividade é definida como a fração de energia incidente na superfície de um corpo que é refletida por este corpo.

$$\text{Refletividade} \equiv \rho = \frac{\text{Energia refletida pelo corpo}}{\text{Energia incidente no corpo}} \quad (3.12)$$

A refletividade do corpo negro é igual a 0, para todos os comprimentos de onda.

Refletividade hemisférica total  $\rho$ , é definida como fração da irradiação total refletida por uma superfície. Representa a média total integrada sobre a direção e o comprimento de onda.

$$\rho \equiv \frac{G_{\text{refletida}}}{G} \quad (3.13)$$

ou ainda

$$\rho(T) = \frac{\int_0^{\infty} \rho_{\lambda}(\lambda, T) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (3.14)$$

As superfícies podem ser idealizadas como difusas ou especulares, de acordo com a maneira pela qual elas refletem a radiação. Na Figura 3.2, pode-se observar que a reflexão difusa ocorre se a intensidade da radiação refletida for independente do ângulo de reflexão, também independente da direção da radiação incidente; e que a reflexão especular ocorre se toda a reflexão for na direção de  $\theta_2$ , que equivale ao ângulo incidente  $\theta_1$ .

Embora nenhuma superfície seja perfeitamente difusa ou especular, a condição difusa é melhor aproximada por superfícies rugosas, e a condição especular por superfícies polidas como espelhos.

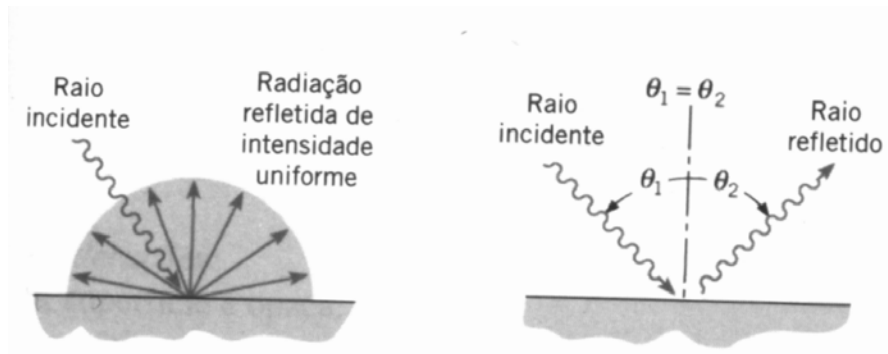


Figura 3.2. Reflexões difusa e especular (Incropera, DeWitt, 2003)

### 3.2.3. Transmissividade

A transmissividade de materiais semitransparentes é definida como a fração da energia incidente que transpõe o material.

$$\text{Transmissividade} \equiv \tau = \frac{\text{Energia que transpõe o corpo}}{\text{Energia incidente no corpo}} \quad (3.15)$$

A radiação que não atravessa o material é parcialmente absorvida e parcialmente refletida nas interfaces.

Transmissividade hemisférica total  $\tau$  é definida como fração da irradiação total transmitida através de um material semitransparente. Representa a média total integrada sobre a direção e o comprimento de onda.

$$\tau \equiv \frac{G_{\text{transmitida}}}{G} \quad (3.16)$$

ou ainda

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (3.17)$$

### 3.3. Lei de Kirchhoff

A lei de Kirchhoff define as relações entre emissividade e a absorvidade da superfície de um corpo. Esta lei pode ter variações necessárias impondo condições, dependendo das quantidades que estão sendo consideradas, quer seja espectral, ou total, ou direcional ou hemisférica.

$$\varepsilon_{\lambda\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T_A) = \alpha_{\lambda\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T_A) \quad (3.18)$$

A eq. 3.21 é a forma mais geral da Lei de Kirchhoff. Esta relação entre a emissividade espectral direcional e absorvidade espectral direcional é válida sem restrições.

### 3.4. Superfícies difusas, cinzas e opacas

Em cálculos e análises de trocas radiantes entre cavidades com múltiplas superfícies, é comum considerar que as superfícies radiantes são difusas e tem características de um corpo cinza.

O termo superfície difusa significa que a emissividade, a absorvidade e a refletividade não dependem da direção. Para a emissão, a intensidade emitida é uniforme em todas as direções como em um corpo negro. A reflexão também ocorre uniformemente em todas as direções

O termo superfície cinza significa que a emissividade espectral e absorvidade não dependem do comprimento de onda.

Elas podem contudo depender da temperatura. Uma superfície difusa e cinza absorve uma fração fixa da radiação incidente em qualquer direção e em qualquer comprimento de onda, e emite radiação numa fração fixa da radiação do corpo negro para todas as direções e todos os comprimentos de onda (este é o motivo pelo termo “cinza”).

Para superfícies difusas-cinzentas os valores de absorvidade direcional espectral e emissividade direcional espectral e hemisférica total são todas iguais, e absorvidade total hemisférica é independente da natureza da radiação incidente. A absorvidade direcional espectral e emissividade direcional espectral são então independentes de  $\lambda$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ , então  $\alpha_{\lambda\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T_A) = \alpha(T_A)$ , e  $\varepsilon_{\lambda\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T_A) = \varepsilon(T_A)$ , e da Lei de Kirchhoff (para o caso de superfícies difusas-cinzentas) tem-se que

$$\varepsilon(T_A) = \alpha(T_A) \quad (3.19)$$

Os materiais podem ser idealizados como opacos ou transparentes, de acordo com a maneira pela qual elas transmitem a radiação através do meio. Um meio é considerado opaco quanto sua transmissividade é igual a zero. Um meio é considerado semitransparente para transmissividade na faixa de  $0 < \tau < 1$ . Um meio é considerado transparente quando sua transmissividade é igual a 1.

No desenvolvimento deste trabalho considera-se que as superfícies radiantes são difusas, cinzas e opacas. Considerando-se que as superfícies são cinzas, a eq. 3.8 fica

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (3.20)$$

e ainda, considerando-se que as superfícies são opacas (isto é,  $\tau = 0$ , transmissividade nula), tem-se

$$\alpha + \rho = 1 \quad (3.21)$$

onde utilizando-se a lei de Kirchhoff (para o caso particular onde as superfícies são consideradas difusas, cinzas e opacas) tem-se que

$$\varepsilon = 1 - \rho \quad (3.22)$$

#### 4. TROCA DE RADIAÇÃO ENTRE SUPERFÍCIES

Normalmente os problemas de interesse prático na engenharia envolvem a troca de radiação entre duas ou mais superfícies. Para avaliação de troca de calor por radiação entre superfícies, é necessária ainda a definição de alguns conceitos adicionais, como radiosidade, superfície reirradiante, e fator de forma.

Define-se a radiosidade “J” [W/m<sup>2</sup>] como sendo o fluxo de energia que sai da superfície (energia emitida mais energia refletida). A eq. 4.1 descreve a radiosidade “J” para uma superfície opaca “i”

$$J_i = \varepsilon_i \cdot E_{bi} + \rho_i \cdot G_i = \varepsilon_i \cdot E_{bi} + (1 - \varepsilon_i) \cdot G_i \quad (4.1)$$

onde  $\varepsilon_i$  é o valor da emissividade da superfície “i”;  $E_{bi}$  é o poder emissivo do corpo negro na temperatura, por unidade de área, da superfície “i”;  $\rho_i$  é o valor da refletividade da superfície “i”;  $G_i$  é o valor da irradiação (potência radiante incidente, por unidade de área, sobre a superfície “i”).

Define-se como superfície reirradiante a superfície caracterizada pela transferência de calor líquida nula, isto é, a superfície reirradiante é idealizada como uma superfície com isolamento térmico perfeito. A consideração de uma superfície reirradiante é comum em muitas aplicações industriais. Ela é bem aproximada por superfícies reais que são bem isoladas termicamente em um lado e para os quais os efeitos de convecção e condução podem ser desprezados no lado oposto radiante. Em um invólucro (cavidade radiante), a temperatura de equilíbrio de uma superfície reirradiante é determinada por sua interação com outras superfícies e é independente do valor de sua emissividade.

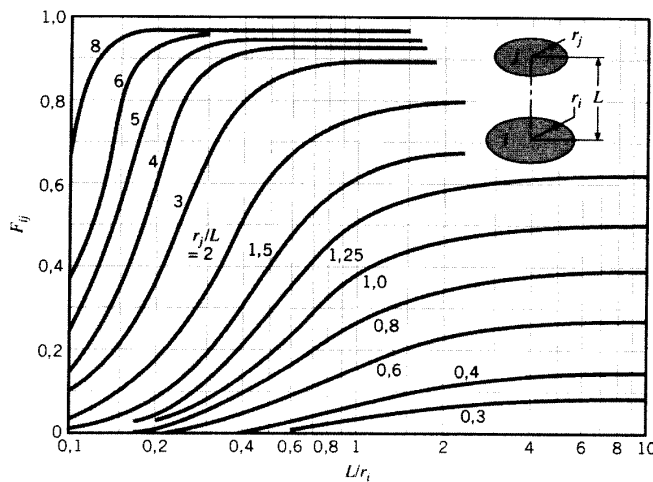
Define-se fator de forma para considerar os efeitos das orientações espaciais entre as superfícies analisadas. Fisicamente o fator de forma “ $F_{ij}$ ” entre duas superfícies “i” e “j” representa a fração da energia radiante que deixa a superfície “i” e é interceptada pela superfície “j”, conforme eq. 4.2.

$$F_{i \rightarrow j} = \frac{q_{i \rightarrow j}}{A_i \cdot J_i} \quad (4.2)$$

O fator de forma pode ser difuso ou especular. Neste trabalho consideram-se válidas algumas idealizações, as superfícies avaliadas são emissoras difusas e as reflexões ocorridas são

difusas. Emprega-se apenas o termo fator de forma, e este termo corresponde a fator de forma difuso. O fator de forma também é chamado de fator de visão, ou fator de configuração.

A literatura apresenta fatores de forma para diversas configurações geométricas tridimensionais. Aqui se apresenta apenas uma destas configurações de interesse para esta dissertação – discos paralelos coaxiais, conforme Figura 4.1, e equações 4.3, 4.4, 4.5.



$$R_i = \frac{r_i}{L}, R_j = \frac{r_j}{L} \quad (4.3)$$

$$S = 1 + \frac{1 + R_j^2}{R_i^2} \quad (4.4)$$

$$F_{i \rightarrow j} = \frac{1}{2} \left\{ S - [S^2 - 4 \left( \frac{r_j}{r_i} \right)^2]^{0.5} \right\} \quad (4.5)$$

Figura 4.1. Fator de forma para discos paralelos coaxiais (Incropera, DeWitt, 2003)

Os fatores de forma possuem duas propriedades importantes, que auxiliam na determinação de fatores de forma a partir do conhecimento de outros. As duas relações para fatores de forma, de uma cavidade onde “N” é o número de superfícies,  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ , são:

Relação de reciprocidade:

$$A_i \cdot F_{i \rightarrow j} = A_j \cdot F_{j \rightarrow i} \quad (4.6)$$

Regra do somatório:

$$\sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} = 1 \quad (4.7)$$

Pode-se ainda apresentar outra propriedade dos fatores de forma

$$F_{i \rightarrow i} = 0, \text{ se a superfície de área } A_i \text{ for plana ou convexa} \quad (4.8)$$

$$F_{i \rightarrow i} \neq 0, \text{ se a superfície de área } A_i \text{ for côncava} \quad (4.9)$$

#### 4.1. Troca de radiação do corpo negro

O cálculo de transferência de calor entre superfícies negras é relativamente simples, pois toda a energia que atinge a superfície é absorvida. De um modo geral, a troca de radiação, em uma cavidade fechada (invólucro fechado) de múltiplas superfícies opacas e não-negras, se torna mais complexa, pois parte da radiação incidente na superfície é absorvida, e parte é refletida. Pode ainda sofrer múltiplas reflexões de todas as superfícies, com absorção parcial ocorrendo em cada uma.

Inicialmente pode-se simplificar imaginando superfícies aproximadas ao corpo negro, não ocorrendo assim reflexão. Sendo assim, a energia sai apenas por emissão, e toda radiação incidente é absorvida.

Definindo  $q_{i \rightarrow j}$  como a taxa na qual a radiação deixa a superfície 'i', e é interceptado pela superfície 'j', segue que

$$q_{i \rightarrow j} = (A_i \cdot J_i) F_{ij} \quad (4.10)$$

como a radiosidade é igual ao poder emissivo para uma superfície negra ( $J_i = E_{bi}$ )

$$q_{i \rightarrow j} = A_i \cdot F_{ij} \cdot E_{bi} \quad (4.11)$$

similarmente tem-se

$$q_{j \rightarrow i} = A_j \cdot F_{ji} \cdot E_{bj} \quad (4.12)$$

Assim, a troca radiante líquida “ $q_{ij}$ ” que ocorre entre duas superfícies pode então ser definida como

$$q_{ij} = A_i \cdot F_{ij} \cdot E_{bi} - A_j \cdot F_{ji} \cdot E_{bj} \quad (4.13)$$

Da lei de Stefan-Boltzmann, e da lei de reciprocidade dos fatores de forma tem-se

$$q_{ij} = A_i \cdot F_{ij} \cdot \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (4.14)$$

Esta equação fornece a taxa líquida na qual a radiação deixa a superfície  $i$  como resultado de sua interação com a  $j$ , que é igual a taxa líquida na qual  $j$  recebe radiação devido a sua interação com  $i$ . Esta equação também pode ser utilizada para avaliar a transferência de calor líquida de radiação de superfície qualquer em um invólucro de superfícies negras. Com “N” superfícies mantidas a temperaturas diferentes, a transferência líquida da radiação da superfície “ $i$ ” é devida à troca com as superfícies restantes, e pode ser apresentada como

$$q_i = \sum_{j=1}^N q_{ij} = \sum_{j=1}^N A_i \cdot F_{ij} \cdot \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (4.15)$$

#### 4.2. Troca de radiação em cavidade radiante fechada

No método utilizado para solução de troca de radiação entre superfícies reais, apresentado neste trabalho, são consideradas válidas algumas simplificações quanto as características das superfícies e suas propriedades radiantes, simplificações estas perfeitamente aceitáveis na maior parte das aplicações de engenharia. Seguem as descrições das simplificações gerais adotadas:

- As propriedades radiantes (isto é refletividade, emissividade, absorvidade) são uniformes independentes da direção (superfícies difusas) e independente do comprimento de onda (superfícies cinzas)
- A temperatura é uniforme sobre toda superfície de cada zona (superfície isotérmica)
- A irradiação e radiosidade são uniformes sobre toda superfície de cada zona
- O fluxo de calor resultante que atravessa a superfície é uniforme sobre toda superfície de cada zona
- As superfícies são opacas (isto é  $\tau = 0$ , então  $\alpha + \rho = 1$ , ou ainda  $\varepsilon + \rho = 1$ ,  $\varepsilon = 1 - \rho$ )
- O espaço interno é preenchido por um meio inerte nos processos radiantes (meio não-participante)

A metodologia mais geral para avaliação da troca de radiação em cavidades radiantes é baseada na matriz das radiosidades, porém neste trabalho utiliza-se um método prático para soluções de troca de radiação em cavidades de até três superfícies, onde uma das superfícies é reirradiante. Este método é baseado na analogia com circuitos elétricos.



#### 4.2.1. Método do circuito elétrico equivalente para solução de cavidades radiantes

Este método foi introduzido por Oppenheim em 1956 (apud Özisik, 1990). Proporciona boa visualização dos conceitos físicos da troca de calor entre superfícies, e possui fácil aplicação para solução de cavidades com pequeno número de superfícies. É amplamente apresentado e desenvolvido na literatura técnica, sendo assim apresentam-se aqui somente suas conclusões principais.

Este método analisa os fluxos de energia térmica radiante entre superfícies de cavidades que ocorrem através das respectivas resistências térmicas representadas pelo o arranjo das características geométricas (áreas das superfícies e fatores de forma) e propriedades radiantes das superfícies (emissividade).

A Figura 4.2 localiza espacialmente a resistência térmica “ $R_i$ ” entre uma superfície real e um plano imaginário, onde flui a potência térmica “ $q_i$ ” entre os pontos potenciais  $E_{bi}$  e  $J_i$ .

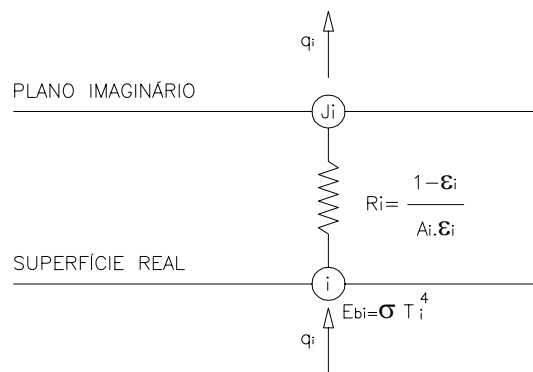


Figura 4.2. Resistência superficial a radiação

A potência térmica total “ $q_i$ ” é definida como

$$q_i = \frac{E_{bi} - J_i}{R_i} \quad (4.16)$$

onde a resistência térmica da superfície para radiação “ $R_i$ ” é definido como

$$R_i = \frac{1 - \varepsilon_i}{A_i \varepsilon_i} \quad (4.17)$$

4.2.1.1. Cavidade fechada com superfície reirradiante

O esquema mostrado na Figura 4.3 apresenta um caso particular, onde se tem uma cavidade com três superfícies, sendo que a terceira superfície é reirradiante (adiabática). A superfície reirradiante é considerada por hipótese bem isolada. Logo, com  $q_R = 0$ , a transferência líquida de radiação da superfície 1 deve ser igual à transferência líquida por radiação para superfície 2. O circuito é um arranjo simples em série-paralelo, e de sua análise é prontamente mostrado que

$$q_1 = -q_2 = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{R} \tag{4.18}$$

$$R = R_1 + \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{13} + R_{23}} \right)^{-1} + R_2 \tag{4.19}$$

substituindo tem-se

$$q_1 = -q_2 = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{(1 - \epsilon_1)}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1}{\left[ \left( \frac{1}{A_1 F_{1R}} \right) + \left( \frac{1}{A_2 F_{2R}} \right) \right]} + \frac{(1 - \epsilon_2)}{\epsilon_2 A_2}} \tag{4.20}$$

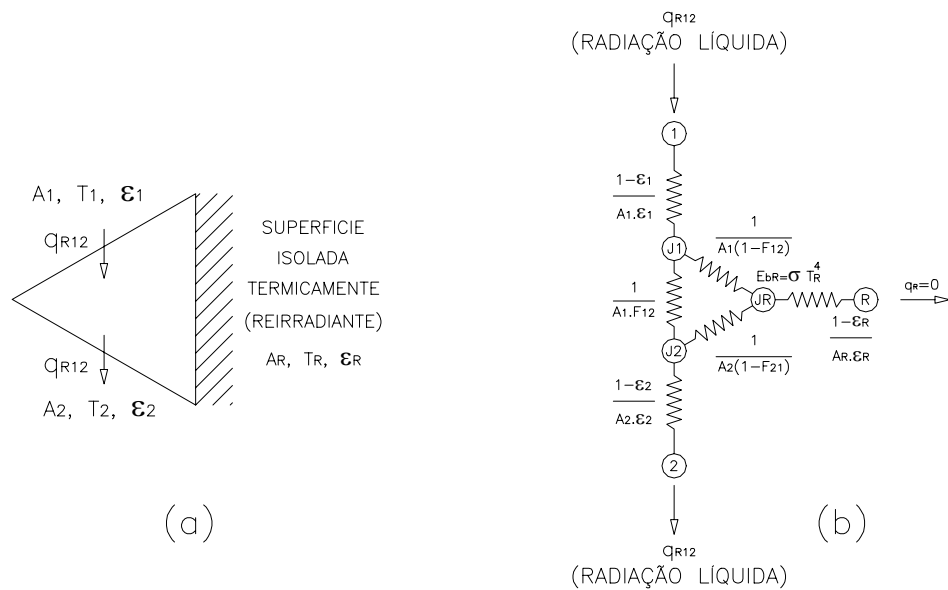


Figura 4.3. Cavidade de três superfícies com uma superfície reirradiante (a) esquema (b) representação do circuito térmico equivalente

### 4.3. Transferência de calor combinada

Na grande maioria dos casos tem-se presente os três mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação, com contribuições da mesma ordem de grandeza, não permitindo desconsiderar o efeito de nenhuma destas contribuições. A Figura 4.4 apresenta um esquema de transferência de calor em uma parede na qual estão presentes os três mecanismos de transferência de calor.

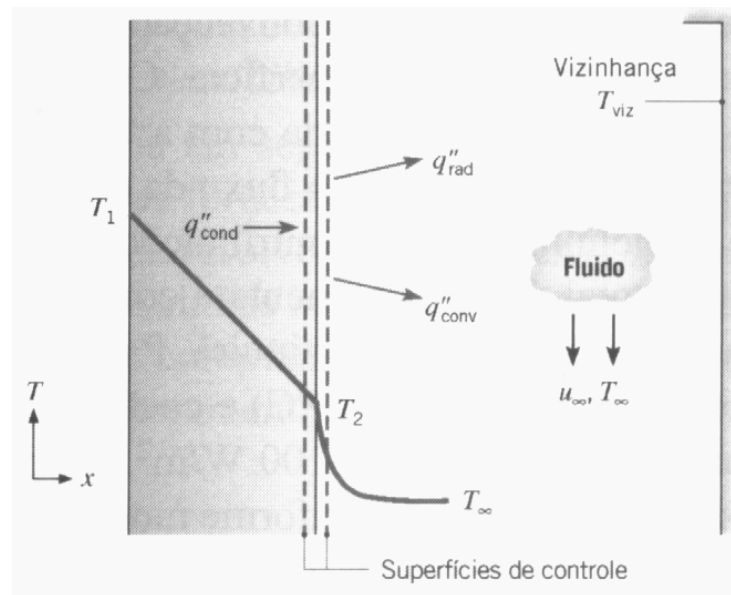


Figura 4.4. Esquema com modos de transferência de calor (Incropera, DeWitt, 2003)

A transferência de calor por condução “ $q_{\text{condução}}$ ” que ocorre entre duas superfícies através de um meio sólido, líquido ou gasoso pode ser calculado com a equação

$$q_{1,2(\text{condução})} = \frac{k_{12} \cdot A \cdot (T_2 - T_1)}{L_{1,2}} \quad (4.21)$$

onde “ $k_{12}$ ” é a condutividade térmica do material entre as superfícies 1 e 2 [W/m K], “ $A$ ” é a área [m<sup>2</sup>], “ $T_1$ ” é a temperatura da superfície 1 [K], “ $T_2$ ” é a temperatura da superfície 2 [K], “ $L_{12}$ ” é a distância entre as superfícies 1 e 2 [m].

A transferência de calor por convecção “ $q_{\text{convecção}}$ ” que ocorre em uma superfície quando em contato com um meio líquido ou gasoso pode ser calculado com a equação

$$q_{2,\infty(\text{convecção})} = h_{2\infty} \cdot A \cdot (T_{\infty} - T_2) \quad (4.22)$$

onde “ $h_{2\infty}$ ” é o coeficiente de transferência por convecção entre as superfície 2 e meio fluido [ $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$ ], “ $A$ ” é a área [ $\text{m}^2$ ], “ $T_2$ ” é a temperatura da superfície 2 [ $\text{K}$ ], “ $T_{\infty}$ ” é a temperatura do meio fluido [ $\text{K}$ ],

A transferência de calor por radiação “ $q_{\text{radiação}}$ ” que ocorre entre uma superfície e sua vizinhança com a equação

$$q_{2,\text{vizinhança}(\text{radiação})} = \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_2^4 - T_{\text{vizinhança}}^4) \quad (4.23)$$

onde “ $\varepsilon_2$ ” é a emissividade na superfície 2,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann  $\sigma = 5,6704 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ , “ $A$ ” é a área [ $\text{m}^2$ ], “ $T_2$ ” é a temperatura da superfície 2 [ $\text{K}$ ], “ $T_{\text{vizinhança}}$ ” é a temperatura da vizinhança [ $\text{K}$ ],

Analisando a Figura 4.4, e efetuando um balanço de energia na superfície de controle, tem-se que

$$q_{1,2(\text{condução})} = q_{2,\infty(\text{convecção})} + q_{2,\text{vizinhança}(\text{radiação})} \quad (4.24)$$

ou ainda

$$\frac{k_{12}(T_2 - T_1)}{L_{1,2}} = h_{2\infty}(T_{\infty} - T_2) + \varepsilon_2 \sigma (T_2^4 - T_{\text{vizinhança}}^4) \quad (4.25)$$

Pode-se ainda ter o meio fluido participando também das trocas radiantes, porém como já foi comentado anteriormente, neste trabalho considera-se que o meio é preenchido com ar atmosférico, um fluido não-participante, isto é, não tem influencia nas trocas de calor por radiação.

A seguir estes conceitos de transferência de calor combinada serão utilizados para elaboração do modelo térmico teórico de interesse nesta dissertação: modelo teórico do calorímetro tipo cavidade com três superfícies, sendo duas superfícies planas radiantes horizontais, e uma superfície cilíndrica reirradiante vertical. Cavidade esta preenchida com ar.

O referido modelo irá avaliar as trocas de calor radiante entre as superfícies combinado com a condução de calor pelo ar.

## 5. MÉTODOS EXPERIMENTAIS PARA MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE

A determinação experimental do valor da emissividade dos materiais é difícil em todas as temperaturas. Os experimentos necessitam uma análise cuidadosa, pois é difícil manter um sistema livre dos efeitos da transferência de calor por condução e convecção, e da absorção da radiação.

Foram desenvolvidas diferentes técnicas para medidas de propriedades radiantes das superfícies. Basicamente podem-se obter os valores de emissividade de três maneiras: através de medidas calorimétricas, medidas radiométricas diretas, e medidas radiométricas por reflexão.

Métodos radiométricos utilizam sensores de radiação, os quais produzem um sinal elétrico (tensão, resistência elétrica, etc) proporcional ao fluxo de energia radiante a que estão expostos.

Métodos calorimétricos baseiam-se no balanço de energia e no conhecimento dos caminhos e quantidades dos fluxos de energia. Para garantir que o fluxo de calor ocorra em determinadas direções de interesse e que não ocorra em outras direções indesejáveis normalmente utiliza-se dispositivos tipo guarda térmica, e/ou vácuo.

A partir de medidas de reflexão em amostras opacas pode-se obter a emissividade através da Lei de Kirchhoff ( $\epsilon_\lambda = 1 - \rho_\lambda$ ).

Com métodos radiométricos normalmente se mede a emissividade direcional, a menos que se tenha todo o hemisfério revestido do material da amostra. Com os métodos calorimétricos é possível obter-se tanto a emissividade direcional, como a emissividade hemisférica.

Segue uma breve revisão de equipamentos, técnicas e dispositivos para medição de emissividade, disponíveis na literatura, possíveis de serem utilizados para este fim.

### 5.1. Radiômetro

Radiômetro é um equipamento utilizado para medições de intensidade de radiação. Alguns radiômetros são projetados para medir temperatura sem contato. Com equipamento comercial de boa qualidade, com faixa de emissividade ajustável, pode-se determinar experimentalmente a emissividade de uma superfície. A metodologia apresentada para utilização de radiômetro para medição de emissividade, também podem ser aplicada à câmera termográfica. A figura 5.1.a apresenta um radiômetro típico. A figura 5.1.b apresenta um detalhe

do sensor de radiação composto por vários termopares interligados em série para amplificar sinal elétrico de saída.

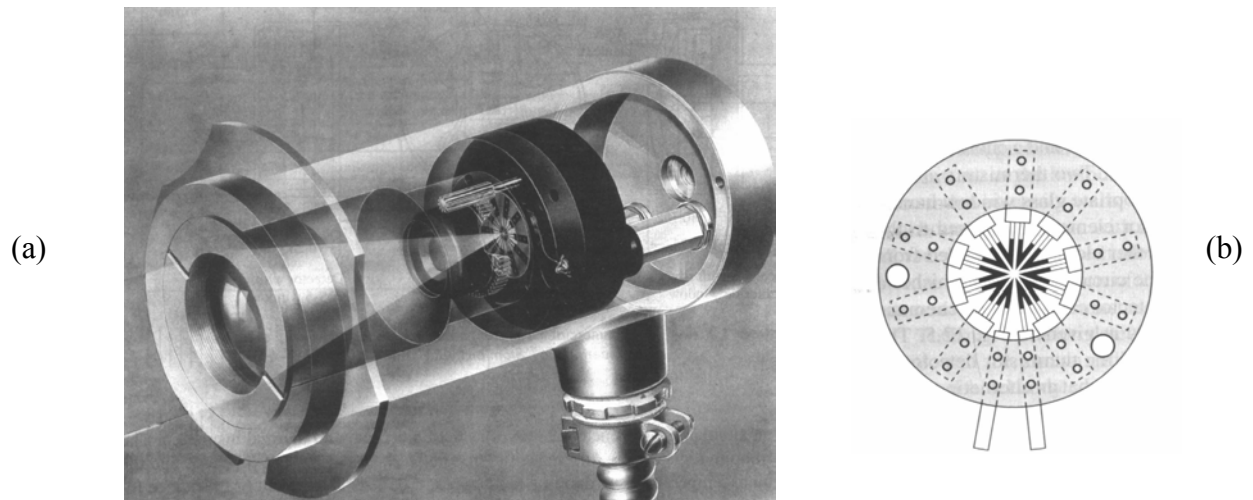


Figura 5.1 Radiômetro típico (a) Vista interna, (b) Detalhe dos elementos sensores; fabricante Honeywell (Holman, 2001)

Quando se mede a temperatura de uma superfície utilizando um radiômetro (distante da superfície da amostra), onde a radiação emitida pela superfície atravessa um meio, deve-se lembrar que o sensor está medindo a radiação emitida por esta superfície, somada a radiação emitida pela vizinhança refletida por esta superfície, somada ainda a radiação emitida pelo meio, considerando ainda a influência da transmissividade do meio nos dois primeiros termos.

As medições de temperatura com radiômetro devem ser feitas com a menor distância entre o sensor e a amostra, para minimizar o efeito indesejável causado pela temperatura da vizinhança na medida realizada. Este problema é maior em superfícies de amostras com baixa emissividade ( $\epsilon \sim 0,1$ ), do que em amostras com alta emissividade ( $\epsilon \sim 0,9$ ).

Medições de emissividade com radiômetros são práticas e rápidas, porém normalmente são limitadas dentro de uma pequena faixa do espectro. Usualmente radiômetros possuem filtros óticos espectrais na faixa espectral de 8 a 14  $\mu\text{m}$ , permitindo medição de temperatura a longa distância, sem que a medida de temperatura seja influenciada pelo ar atmosférico, pois nesta faixa o ar atmosférico possui uma janela espectral totalmente transparente (isto é  $\tau_{\text{ar},\lambda = 8 \text{ a } 14 \mu\text{m}} = 1$ ), que demonstra ser razoável considerar o ar ser um meio não participante.

Esta limitação espectral proposital é útil no processo de medição de temperatura, mas pode ser um problema quando se utiliza este radiômetro para medição de emissividade. O valor da emissividade hemisférica da medida realizada é resultante da integração na faixa espectral

limitada entre 8 a 14  $\mu\text{m}$ , representada pela eq. 5.1, que por sua vez pode ser totalmente diferente da real emissividade hemisférica total, a qual é integrada em todo o espectro de radiação térmica entre 0,1 a 100  $\mu\text{m}$ . Este problema pode ser ainda maior quando se tem superfícies com propriedades radiantes espectralmente seletivas (materiais que possuem alta emissividade em uma faixa espectral, e baixa emissividade no resto do espectro).

$$\varepsilon(T) \cong \frac{\int_8^{14} \varepsilon_\lambda(\lambda, T) E_{\lambda,b}(\lambda, T) d\lambda}{\int_8^{14} E_b(\lambda, T) d\lambda} \quad (5.1)$$

Seguem dois métodos práticos para utilização de radiômetro para medição de emissividade. São eles: simulação de corpo negro sobre amostra, e amostra com temperatura conhecida.

#### 5.1.1. Simulação de corpo negro na amostra

Este método consiste em simular um corpo negro na amostra, na mesma temperatura.

A simulação do corpo negro pode ser feita utilizando uma fita preta adesiva com alta emissividade (da ordem de 0,95), colada sobre a superfície na qual se quer medir a emissividade. Como a fita apresenta pequena espessura é plausível supor que decorrido um curto espaço de tempo desde o momento em que a fita foi colada sobre a superfície, a temperatura da superfície da fita será muito próxima (ou igual) à temperatura da superfície do material de emissividade desconhecida.

Assim haverá duas superfícies lado a lado com mesma temperatura e emissividades diferentes, onde uma das superfícies possui emissividade conhecida (fita). Com um radiômetro com valor de emissividade variável, ajusta-se a emissividade no radiômetro com o valor da emissividade conhecida da fita e mede-se a temperatura da mesma. Uma vez conhecida a temperatura da fita, aponta-se agora o radiômetro para a amostra de emissividade desconhecida (que esta a mesma temperatura da fita) e se varia o valor da emissividade no radiômetro, até que a temperatura indicada seja igual a temperatura medida anteriormente sobre a fita. Neste momento a emissividade que esta ajustada no radiômetro é a emissividade da amostra.

Caso a amostra seja pequena pode-se colar a fita adesiva, efetuar a medição e depois retirar a fita e fazer a medição em seguida no mesmo local da amostra que estava colocada a fita.

Pode-se ainda simular o corpo negro de outras maneiras como:

- Utilizar tinta preta com emissividade conhecida, ao invés de fita adesiva.
- Utilizar técnicas para aumento da emissividade aparente inserindo cavidades no material, conforme apresentada no anexo A2, desta dissertação, aplicável em materiais onde espera-se alta emissividade (da ordem de 0,9), e que seja possível de se fazer um furo. Por exemplo, fazendo-se um furo com profundidade cerca de 5 vezes o raio do furo, aumenta-se a emissividade aparente de uma amostra que possui emissividade da ordem de 0,9 para uma emissividade aparente aproximada de 0,97.

### 5.1.2. Amostra com temperatura conhecida

Pode-se medir experimentalmente a emissividade de uma amostra de temperatura conhecida. Para tanto, utilizam-se sensores de contato (como termopares, pt100, e outros) para medir a temperatura da amostra. Uma vez conhecida a temperatura da amostra, inicia-se a medição com o radiômetro, alterando-se a emissividade ajustável do radiômetro até que a temperatura indicada no radiômetro seja igual à temperatura medida com o termopar. Neste momento a emissividade que está ajustada no radiômetro é a emissividade da amostra.

A Figura 5.2.a. mostra um aparato para medição de emissividade normal total proposto por Snyder, Gier, Dunkle (apud Holman, 2001). Este aparato utiliza um radiômetro com sensor tipo termopilha. Um aquecedor elétrico é utilizado para manter a temperatura da amostra, enquanto um sensor de temperatura tipo termopar embutido na amostra fornece a indicação da temperatura. O sensor tipo termopilha é mostrado em detalhe na Figura 5.2.b. Este é construído por 160 junções de prata-constantan montados em um encapsulamento cilíndrico, pintado de preto interiormente. Duas tiras de chapa de alumínio pintadas de preto são presas nas junções. A proteção traseira tem uma abertura estreita que permite que uma tira preta (sobre a junção quente) seja exposta ao fluxo radiante proveniente da amostra, enquanto a outra tira preta (sobre a junção fria) é exposta a temperatura do encapsulamento da termopilha. Esta diferença de temperatura entre a junção quente e junção fria, é proporcional ao fluxo radiante proveniente da amostra, que por sua vez pode ser associado à emissividade da amostra. Este dispositivo fornece essencialmente um sinal de saída linear de 0,0404 mV por  $W/m^2$  de fluxo radiante. Considerando que as temperaturas das junções fria e quente são essencialmente as mesmas que a do interior do radiômetro (o que parece ser bastante plausível, pois o radiômetro absorve uma pequena



quantidade de energia), e assumindo a amostra "cinza", tem-se que a emissividade normal total da amostra é dada pela equação

$$\varepsilon_{AMOSTRA} = \frac{7,48 \cdot \Delta V}{FF_{AR} \cdot \sigma \cdot (T_A^4 - T_R^4)} \quad (5.2)$$

onde " $\Delta V$ " é a tensão diferencial dos sensores radiométricos, medido em mV; " $T_A$ " temperatura da amostra, e " $T_R$ " temperatura do radiômetro, medidas em °R; e  $FF_{AR}$  é o fator de forma entre amostra e radiômetro, calculado pela equação

$$FF_{AR} = \frac{r_1^2}{r_1^2 + L^2} \quad (5.3)$$

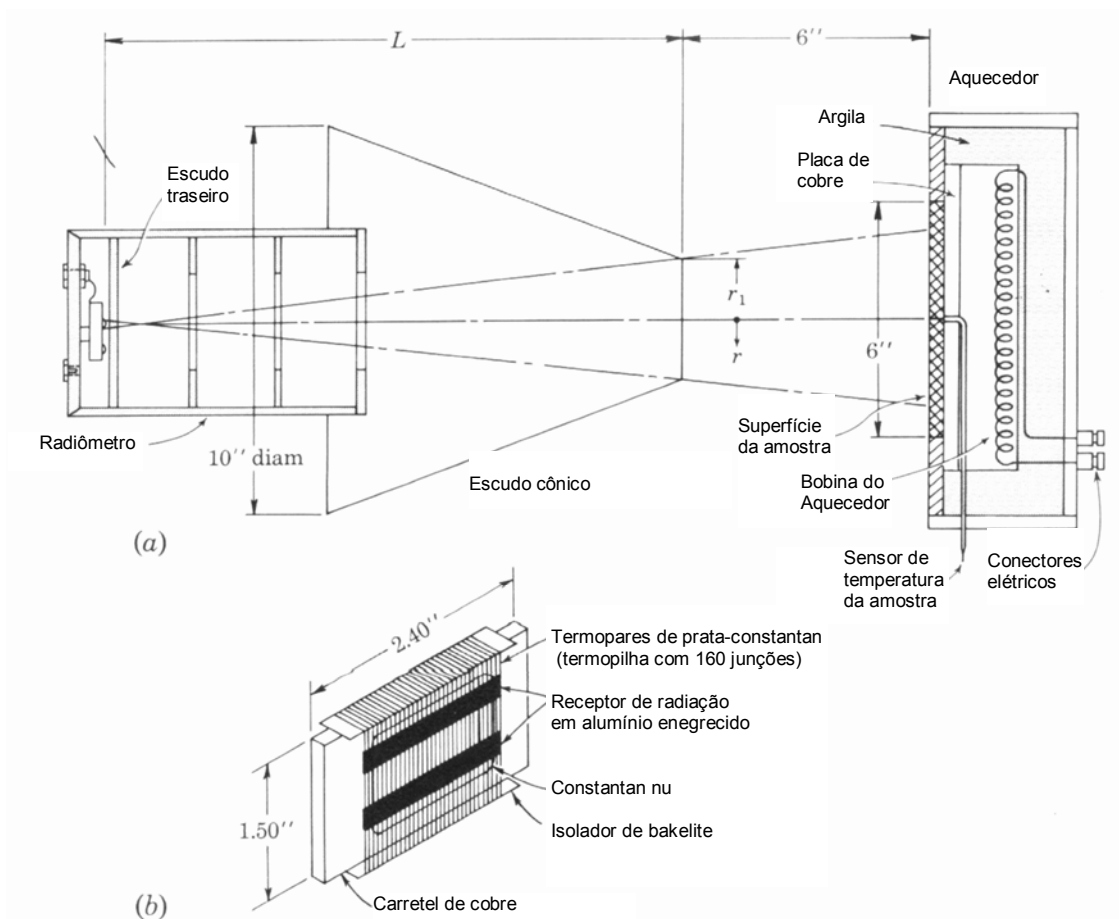


Figura 5.2 Dispositivo para medição de emissividade normal apresentado por Snyder, Gier, Dunkle em 1955, (a) montagem geral, (b) sensor receptor de radiação (adaptado de Holman, 2001)

## 5.2. Sensor de fluxo radiante tipo dupla face

Um dispositivo para medição de emissividade é apresentado em Kern (1980), conforme segue. Um cilindro oco, opaco, com face interna pintado de preto é mantido num banho isotérmico conforme indicado na Figura 5.3. Um receptor de radiação é montado através de um suporte na parede do cilindro. O receptor consiste de um cilindro de cobre (a), pintado internamente de negro e com a superfície externa bem polida. Dois discos de cobre (b) e (b') extremamente finos, escurecidos, e altamente condutores são montados no receptor com o propósito de absorver a radiação.

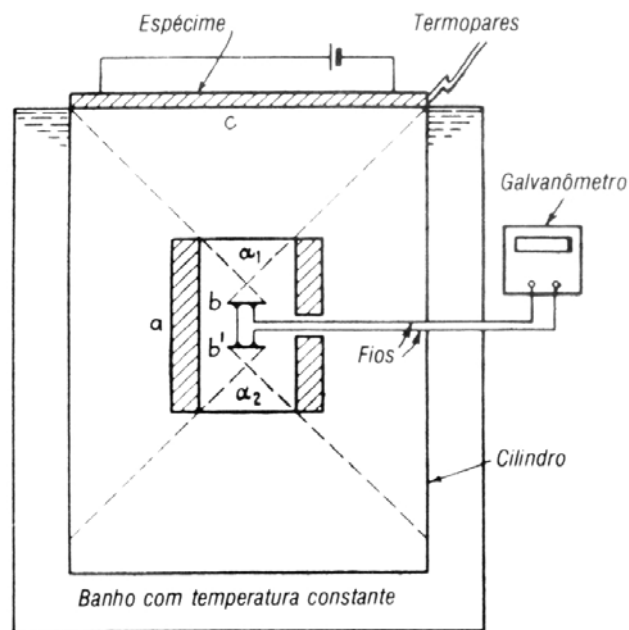


Figura 5.3. Dispositivo para medição de emissividade (Kern, 1980)

Montando-se os discos sensores a iguais distâncias entre o topo e o fundo do pequeno cilindro, os ângulos  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ , são iguais, e os discos possuem área iguais para recepção da radiação. O disco sensor inferior recebe radiação das paredes negras isotérmicas do recipiente. O disco sensor superior recebe a radiação de uma placa de espécime (c) de um material que é mantido eletricamente a uma mesma temperatura. Os dois discos sensores são ligados por fios termopares sensíveis de modo que eles se oponham entre si, e somente as diferenças líquidas da radiação são medidas pelo galvanômetro. Ligando-os entre si em oposição, qualquer efeito dentro do próprio receptor é também cancelado. Se o desvio do galvanômetro para o espécime que não é corpo negro for medido e a seguir a amostra for substituída por um corpo negro, a razão entre os dois desvios do galvanômetro fornece a emissividade do espécime.

### 5.3. Calorímetro tipo cavidade

A Figura 5.4 apresenta o esquema de um calorímetro composto basicamente por uma cavidade esférica com vácuo, amostra da qual se quer medir a emissividade total, aquecedor elétrico, sensores de temperatura, apresentado em Wiebelt (1966).

Para se efetuar as medições de emissividade da amostra, as superfícies internas da cavidade devem ser resfriadas e mantidas em temperatura constante. A amostra deve ser aquecida por um aquecedor elétrico interno. A emissividade do invólucro de paredes resfriadas deve ser conhecida e de valor próximo de 1, deve-se ainda considerar o fator de forma entre a amostra e o interior da cavidade esférica ( $F_{AMOSTRA, PAREDE} = 1$ ).

Uma vez que o sistema chega ao equilíbrio térmico, pode-se medir simultaneamente a temperatura da parede resfriada, a temperatura da superfície da amostra, e a potência elétrica despendida no aquecedor.

O balanço térmico pode ser facilmente modelado, sabendo que toda a potência elétrica inserida na amostra será perdida (quase que totalmente) apenas por emissão de radiação da amostra para o invólucro resfriado internamente. Como há vácuo no interior da cavidade as parcelas de transferência de calor por convecção e por condução são desprezadas.

No método de medição calorimétrico em regime permanente pode-se utilizar a eq. 5.4

$$\varepsilon_{AMOSTRA}(T) = \frac{P_{AQUECIMENTO}}{A_{AMOSTRA} \cdot \sigma \cdot (T_{AMOSTRA}^4 - T_{PAREDE}^4)} \quad (5.4)$$

e no método de medição calorimétrico em regime transiente pode-se utilizar a eq. 5.5

$$\varepsilon_{AMOSTRA}(T) = \frac{P_{AQUECIMENTO} - m_A \cdot c_A \cdot dT_{AMOSTRA} / dt}{A_{AMOSTRA} \cdot \sigma \cdot (T_{AMOSTRA}^4 - T_{PAREDE}^4)} \quad (5.5)$$

onde  $m_A$  é a massa da amostra, e  $c_A$  é o valor do calor específico da amostra.

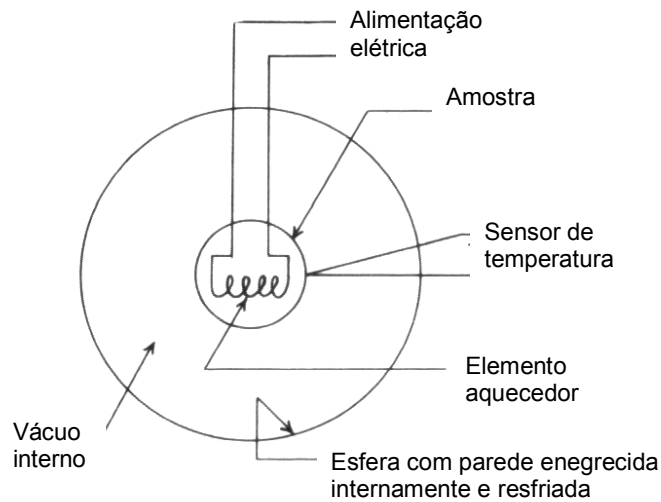


Figura 5.4 Esquema de sistema para medida calorimétrica da emissividade total (adaptado de Wiebelt, 1966)

Krenzinger (1979) utilizou um equipamento similar para determinar a emissividade de tubos metálicos (cobre comercial polido e oxidado) com valores de emissividade muito baixos (da ordem de 0,03). Neste dispositivo, apresentado na Figura 5.5, foi utilizado como invólucro externo um tanque metálico cilíndrico com interior oxidado para aumentar a absorvidade das paredes. Este invólucro foi mergulhado em um banho térmico (em tanque isolado termicamente com nitrogênio líquido), de maneira a manter a temperatura das paredes bastante frias, com temperatura conhecida e constante. A amostra metálica, em forma de tubo, foi introduzida no interior deste involucro, mantida suspensa pelos próprios fios elétricos dos sensores termopares, e cabos de alimentação da energia elétrica para o aquecedor posicionado no interior da amostra. Uma vez atingido o equilíbrio térmico, a temperatura da amostra é medida pelo respectivo termopar, a temperatura interna do involucro é medida com outro termopar, e a potência elétrica  $V \cdot I$  entregue a amostra para seu aquecimento, também é medida simultaneamente em um multímetro. Com isto pode-se calcular a emissividade da amostra, através de um modelo analítico baseado no balanço de energia, onde basicamente tem-se que:

$$\text{Potência elétrica cedida} \cong \text{Potência emitida por radiação da amostra para o envólucro} \quad (5.6)$$

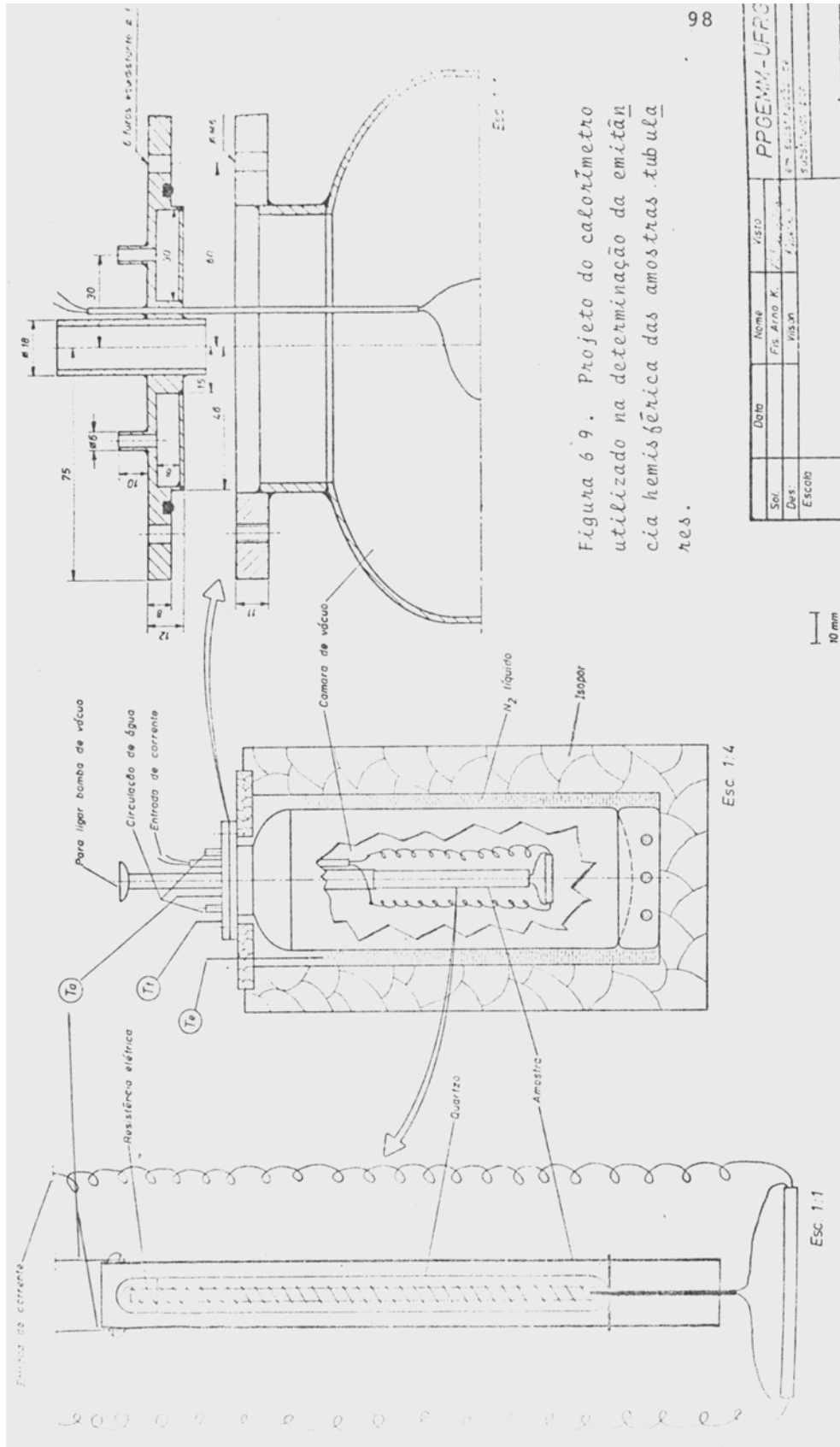
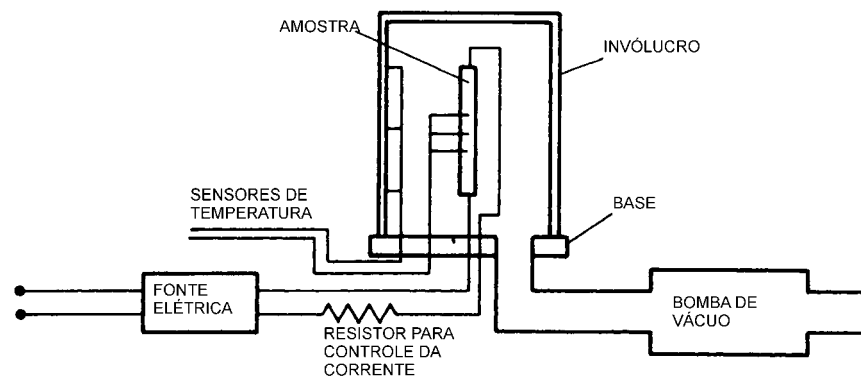
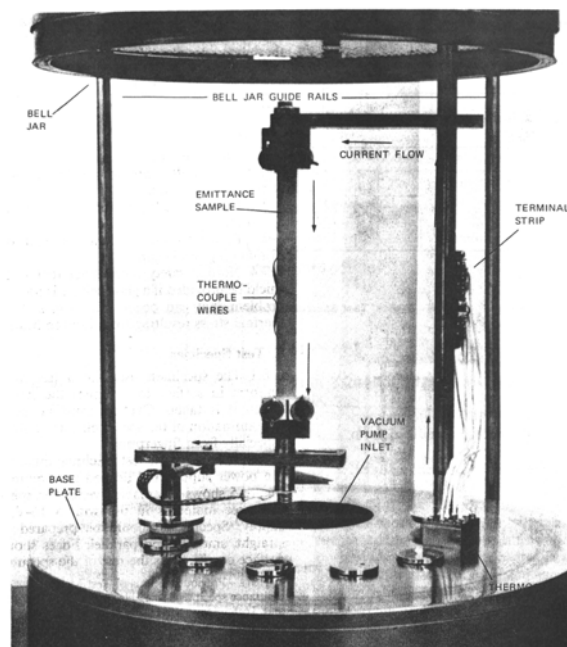


Figura 5.5. Calorímetro utilizado na determinação de emissividade hemisférica de amostras tubulares (Krenzinger, 1979)

A “American Society for Testing and Materials” (ASTM) apresenta aparato similar para medição de emissividade. Este método é completamente descrito na referência ASTM C835 – 95. Neste aparato, apresentado na Figura 5.6, a amostra (fita metálica com ~13 mm de largura por ~250 mm de comprimento) é colocada em uma câmara com vácuo, e é aquecida pela passagem de corrente elétrica até a temperatura desejada para medição da emissividade. A amostra e as paredes da câmara tem medidas suas respectivas temperaturas com três sensores cada. A energia elétrica consumida é igualada ao calor transferido para as vizinhanças, através da equação de Stefan-Boltzmann para calcular o valor da emissividade total hemisférica da superfície da amostra.



(a)



(b)

Figura 5.6. Aparato para medição de emissividade total hemisférica de superfícies de 20 a 1400 °C, (a) esquema, (b) foto do dispositivo (adaptado de ASTM C835-95).

A ASTM C1371 – 97, apresenta também uma padronização para medição de emissividade com medidor comercial portátil, modelo AE, fabricado pela Devices&Services CO.

Este dispositivo, apresentado na Figura 5.7, destina-se a medição de emissividade hemisférica (ver restrições). Consta basicamente num bloco quente emissor acoplado a dois sensores térmicos, do tipo termopilha, um sensor com revestimento de alta emissividade e outro com revestimento de baixa emissividade. Os dois sensores são ligados eletricamente em polaridade inversa de maneira a se ter a tensão diferencial entre eles. Este dispositivo opera de maneira comparativa, em relação a dois padrões de calibração, possui dois padrões de emissividade conhecida (um de alta emissividade tinta preta  $\epsilon \sim 0,9$ , e outra com baixa emissividade  $\epsilon \sim 0,05$ ). Estes dois padrões devem ser mantidos a mesma temperatura que a amostra da qual se deseja medir a emissividade. Mede-se a saída de tensão resultante com o emissor/sensor sobre um padrão, mede-se então o outro padrão, com seu respectivo valor de saída de tensão, por último mede-se a saída de tensão da medição sobre a amostra. Com as tensões medidas versus emissividades conhecidas, encontra-se por interpolação linear a emissividade da amostra.

Cabe citar que possui limitações quanto as medidas de emissividade hemisférica, devido ao limitado fator de visão dos sensores térmicos de radiação, que não conseguem enxergar  $180^\circ$ . Maiores informações sobre limitações, e demais procedimentos, aplicações, cuidados, e erros esperados quanto à utilização deste método são completamente descritos na referência ASTM C1371 – 97.

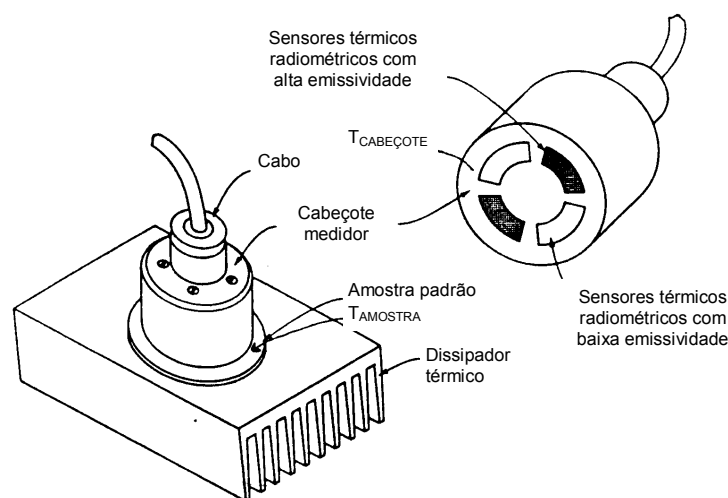
Esperam-se melhores resultados na medição de amostras com valores de condutância térmica maiores de  $1100 \text{ W/m}^2\text{K}$  (condutividade térmica dividida pela espessura da amostra). Por exemplo, para o caso do vidro com condutividade térmica de  $\sim 1.0 \text{ W/m.K}$ , recomenda-se que a espessura da amostra de vidro deve ser menor que  $0,91 \text{ mm}$ .

#### 5.4. Medição de emissividade espectral

A Figura 5.8 apresenta um dispositivo esquemático para medição de emissividade espectral. Para isto tem-se uma cavidade simulando o corpo negro em temperatura igual a temperatura da amostra. O sistema de detecção da radiação espectral (em um único comprimento de onda) possui basicamente um filtro para todos os comprimentos de onda. Isto é conseguido pela utilização de um prisma, grade ou filtros passa-banda.

O sensor de radiação do monocromador fica oscilando, ora medindo a intensidade de radiação emitida pelo corpo negro artificial, ora medindo a intensidade de radiação emitida pela amostra, para cada comprimento de onda. Esta razão entre as intensidades de radiação emitidas pelo corpo negro e pela amostra, em cada comprimento de onda, é a emissividade espectral da amostra, conforme eq. 5.7.

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{I_{\lambda \text{ amostra}}}{I_{\lambda \text{ corpo negro}}} \quad (5.7)$$



(a)



(b)

Figura 5.7. Aparato portátil comercial para medição de emissividade de materiais. (a) Esquema, (b) foto do dispositivo (adaptado de ASTM C1371-97).



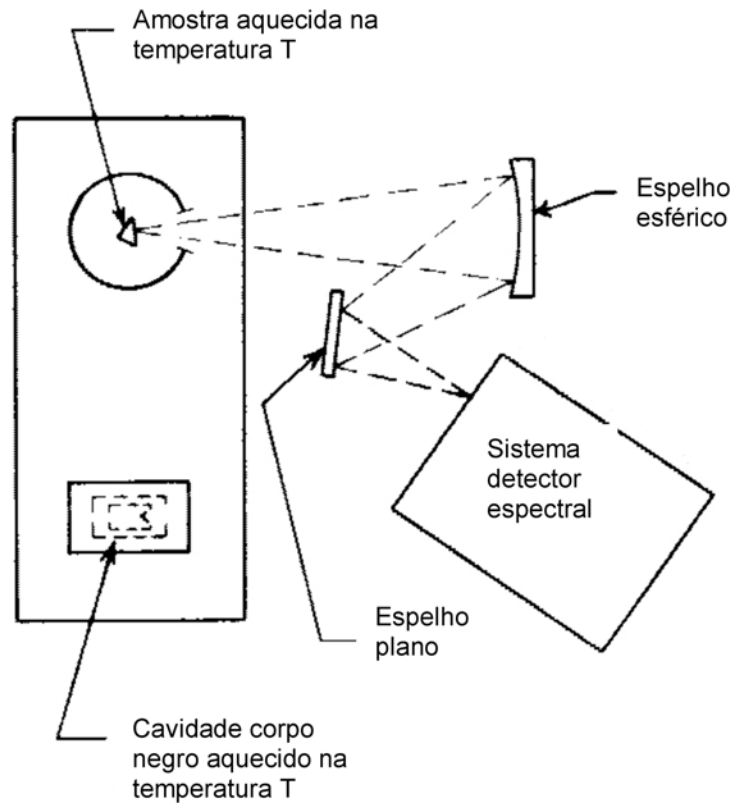


Figura 5.8. Sistema para medição da emissividade espectral (adaptado de Wiebelt, 1966)

### 5.5. Medição de refletividade

Muitas vezes para evitar aquecimento de amostras, causando eventual alteração superficial e conseqüente alteração de suas propriedades radiantes, pode-se utilizar medição de refletividade espectral. A vantagem de utilizar medidas de refletividade está no fato de se aquecer a fonte, enquanto a amostra pode permanecer em baixa temperatura.

Conforme descrito nos capítulos 3.2 e 3.3, a emissividade espectral de superfícies de materiais opacos, pode ser encontrada a partir da Lei de Kirchhoff e balanço de energia na superfície, que resulta em

$$\varepsilon_{\lambda} = 1 - \rho_{\lambda} \quad (5.8)$$

Medições de refletividade espectral são feitas de maneira precisa em dois tipos de refletômetros: o refletômetro hohlraum e refletômetro esfera integradora.

### 5.5.1. Refletômetro hohlraum

A Figura 5.9 apresenta um esquema de um dispositivo para medição de refletividade angular hemisférica espectral. O sensor de radiação do monocromador fica oscilando, ora medindo a intensidade de radiação na posição “A”, ora medindo a intensidade de radiação na posição “B”, para cada comprimento de onda. A radiação na direção “A” é a radiação do corpo negro refletido na amostra (desprezando a radiação emitida pela amostra, pois a amostra é mantida em temperatura muito menor que a temperatura da cavidade). A radiação na direção “B” é a radiação do corpo negro da cavidade. A razão entre a radiação emitida pela amostra e a radiação emitida pelo corpo negro é a refletividade angular hemisférica espectral, isto é, a razão  $I_{\lambda A} / I_{\lambda B}$  é  $\rho_{\lambda}(\mu, \varphi)$ .

$$\rho_{\lambda} = \frac{E_{\lambda,A}}{E_{\lambda,B}} = \frac{I_{\lambda,A}}{I_{\lambda,B}} = \frac{\rho_{\lambda} I_{b\lambda}(T_{CAVIDADE}) + \varepsilon_{\lambda} I_{b\lambda}(T_{AMOSTRA})}{I_{b\lambda}(T_{CAVIDADE})} \quad (5.9)$$

O refletômetro tipo "hohlraum" é considerado o melhor método para medição de refletividade angular hemisférica espectral para longos comprimentos de onda ( $\lambda$  maior que  $1\mu\text{m}$ ). Porém este refletômetro não opera bem em curtos comprimento de onda ( $\lambda$  menor que  $1\mu\text{m}$ ) porque tem-se insuficiente quantidade de energia nas medidas de curto comprimento de onda. Isto é devido a relativa baixa temperatura a qual as paredes da cavidade podem ser mantidas.

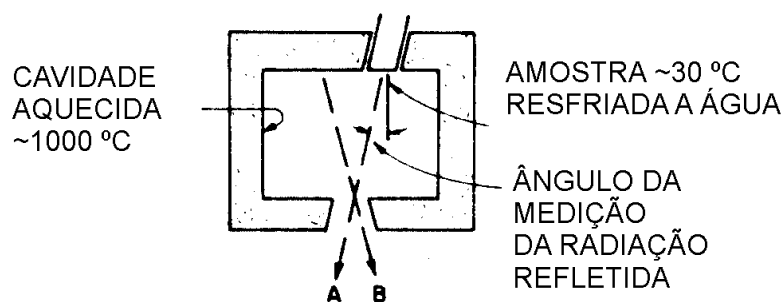


Figura 5.9. Esquema de um refletômetro tipo "hohlraum" para medição de refletividade angular hemisférica espectral. (adaptado de Duffie, 1980)

### 5.5.2. Refletômetro esfera integradora

Para medições de radiação com curtos comprimento de onda ( $\lambda$  na faixa de  $0,3\mu\text{m}$  a  $1\mu\text{m}$ ), utiliza-se refletômetro tipo esfera integradora. Diversas configurações deste tipo de refletômetros são disponíveis. A figura 5.10 apresenta um exemplo de configuração possível. Neste tipo de refletômetro a amostra é suspensa dentro da esfera por um suporte que pode ser girado. Um raio de energia monocromática é direcionado para dentro da esfera incidindo sobre a amostra como indicado na Figura 5.10. Através de um controle externo o ângulo de incidência  $\phi$  pode ser variado. A energia refletida pela amostra é espalhada e refletida nas paredes internas da esfera.

Pela geometria particular da esfera, uma superfície difusa resulta em irradiação uniforme em toda a parede da esfera, exceto na região onde se tem a irradiação direta resultante da primeira reflexão sobre a amostra. Se o detector é posicionado na parede em local que esta primeira reflexão sobre a amostra não intercepta o sensor, o sinal é proporcional a uma constante multiplicado pela refletividade da amostra multiplicada pela irradiação da amostra. Este sinal é comparado ao sinal recebido quando o raio incidente é direcionado para incidência diretamente sobre a superfície interna da esfera. Este sinal é proporcional a uma constante multiplicado pela irradiação.

A comparação destes dois sinais resulta na refletividade direcional monocromática  $\rho_{\lambda\phi}$ .

A Figura 5.11 apresenta um esquema de outra configuração de esfera integradora.

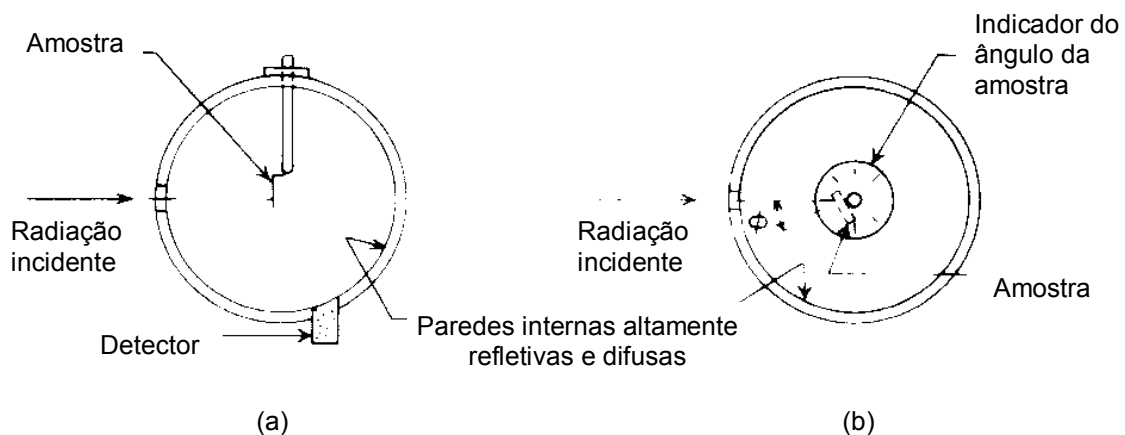


Figura 5.10. Esquema de um refletômetro esfera integradora para medição de refletividade angular hemisférica espectral. (a) vista lateral, (b) vista superior (adaptado de Wiebelt, 1966)

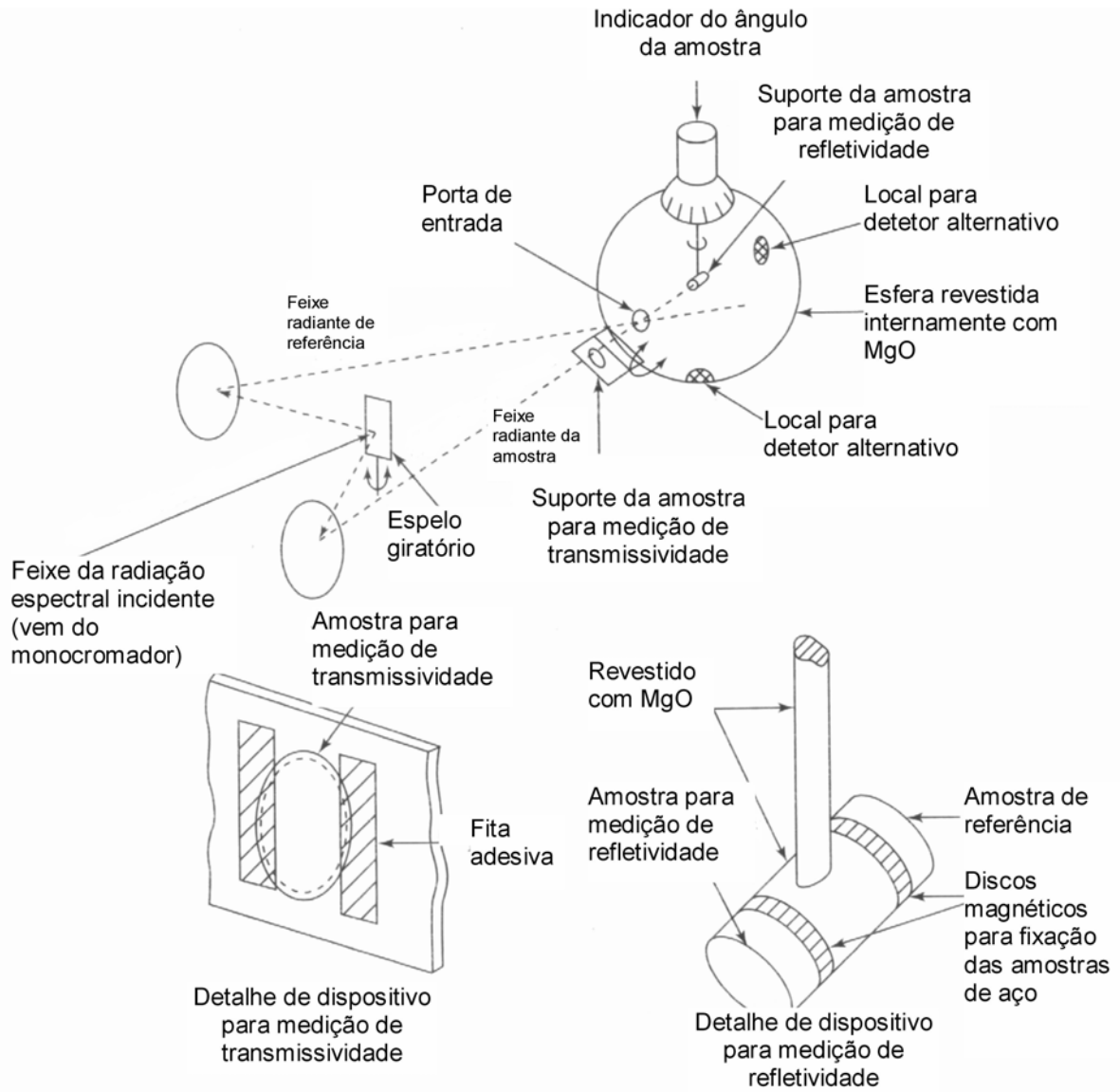


Figura 5.11. Esquema de um refletômetro esfera integradora com detalhe da montagem da amostra (adaptado de Holman, 2001)

## 6. PROJETO DO EXPERIMENTO

O presente trabalho de pesquisa envolve uma combinação de trabalho matemático analítico e trabalho experimental. A teoria se esforça para explicar ou prever o comportamento e resultados dos experimentos, baseados em modelos analíticos os quais estão em concordância com princípios físicos fundamentais, bem estabelecidos ao longo dos anos.

O presente aparato combina um conjunto de métodos e princípios físicos para medição da emissividade hemisférica de amostras a temperatura ambiente. Uma versão preliminar deste equipamento foi apresentada por Krenzinger (2004).

Não é possível medir diretamente a variável ou propriedade física de interesse, a emissividade da amostra. Isto leva a medições indiretas e a um conjunto de problemas aparentemente triviais interdependentes, que se somam contribuindo para o aumento da complexidade do experimento.

As variáveis primárias que serão medidas são temperaturas, tensão elétrica, corrente elétrica. Estas variáveis são analisadas e tratadas analiticamente para se encontrar a variável desejada, a emissividade.

De uma maneira geral, a exatidão dos resultados dos trabalhos experimentais é ditada pelo nível de esforço despendido. Para especificar este grau de exatidão procura-se determinar as limitações do referido aparato experimental, assim como erros regulares e aleatórios que podem ocorrer. Os resultados experimentais encontrados são tratados através de ferramentas técnicas estatísticas para análise dos dados e incertezas experimentais, auxiliando na determinação de erros esperados e desvios das medidas verdadeiras.

Para aumentar a repetitividade e reprodutividade das medições procura-se garantir que as diversas medições ocorram sempre nas mesmas condições, para isto utilizam-se duas guardas térmicas: uma guarda térmica quente (com temperatura controlada mantido na mesma temperatura que o aquecedor principal), e uma guarda térmica fria (com temperatura controlada mantido na mesma temperatura que a temperatura ambiente), garantindo que os processos de transferência de calor ocorram sempre entre duas temperaturas conhecidas: a temperatura do aquecedor e a temperatura ambiente.

As Figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5 mostram aspectos construtivos mecânicos do equipamento, e a Figura 6.6 mostra um esquema da instrumentação acoplada.

Pode-se ver nas Figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5, que o aparato desenvolvido para medição de emissividade é formado pelos seguintes componentes básicos: o calorímetro propriamente dito (placa quente, placa fria, amostra, guarda térmica), e na Figura 6.6 pode-se ver o sistema

auxiliar de instrumentação, medição e controle (fontes de energia elétrica CC, sensores de temperatura, sensores térmicos radiométricos, interface de comunicação entre computador e sensores, computador e programa para aquisição de dados).

O referido equipamento desenvolvido permite a medição de emissividade hemisférica através do método radiométrico e método calorimétrico.

Segue características do aparato experimental desenvolvido e seus componentes.

### 6.1. Calorímetro

O referido equipamento desenvolvido consta de um calorímetro composto basicamente por um aquecedor elétrico, uma guarda térmica, amostra, placa fria resfriada, sistema de refrigeração termoelétrico. Estes componentes são dispostos de maneira a se formar uma cavidade cilíndrica radiante com três superfícies, na qual são avaliados os processos de transferência de calor, para encontrar a emissividade da amostra.

A cavidade radiante cilíndrica será composta por três superfícies: uma superfície quente emissora plana e circular (superfície negra do bloco de alumínio), uma superfície reirradiante cilíndrica (lateral revestida de papel alumínio e isolante térmico tipo espuma flexível), uma superfície fria da amostra plana e circular, da qual se quer medir a emissividade. A cavidade é preenchida com ar ambiente.

O aquecedor elétrico principal consta de uma resistência elétrica plana (de uso comercial típico em ferros de passar roupa) inserida dentro de um bloco metálico emissor.

O bloco quente emissor é composto por um cilindro maciço de alumínio. Devido a alta condutividade térmica do alumínio (204 W/m.K) considera-se o bloco como sendo isotérmico. Este bloco de alumínio é revestido na parte superior e lateral por uma guarda térmica, mantida a mesma temperatura do bloco, de maneira a garantir que não se tenha perda de calor do bloco por estas duas superfícies (superfície superior e lateral). A terceira superfície, a superfície inferior do bloco de alumínio é pintada de preto com tinta preta de uso comercial com alto valor de emissividade. Esta superfície será uma das superfícies de nossa cavidade radiante (superfície 1).

A guarda térmica (ou blindagem térmica) é composta por um segundo aquecedor elétrico e um revestimento isolante térmico. Este aquecedor consta de uma resistência elétrica enrolada em torno uma blindagem metálica (panela de alumínio). O conjunto é preenchido com isolante térmico tipo poliuretano expandido com condutividade térmica baixa (em torno de 0,03 W/m.K). A guarda térmica é energizada e controlada externamente para que sua temperatura seja igual ao

do bloco de quente emissor. A guarda térmica cobre a parte superior e lateral do bloco quente, com o objetivo de garantir que não ocorra perda térmica nestas duas superfícies, de modo que toda a potência injetada no bloco de quente emissor (aquecedor) saia somente por sua superfície radiante pintada de preto (superfície 1).

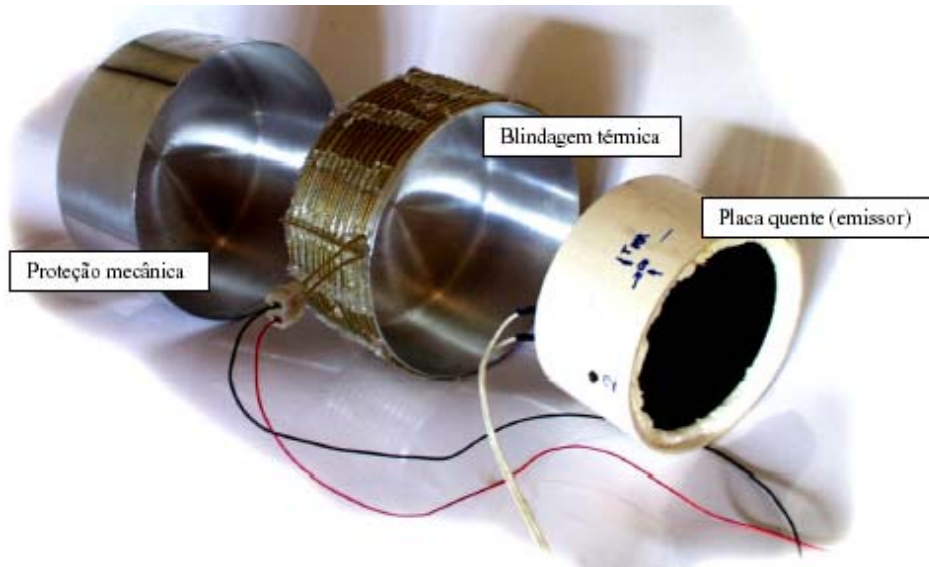


Figura 6.1. Vista do bloco quente emissor, e respectiva blindagem térmica antes da montagem.

A amostra da qual se quer medir a emissividade deverá ser plana, em forma de lamina, com pequena espessura (preferencialmente menor que 10 mm). Uma das superfícies da amostra fará parte de uma das superfícies da cavidade radiante, e a outra deve ser acomodada sobre placa fria, com temperatura aproximada à temperatura ambiente.

A placa fria inferior será composta por uma placa espessa de alumínio com temperatura controlada próxima a temperatura ambiente. Novamente devido à alta condutividade térmica do alumínio (204 W/m.K) considera-se a placa espessa como sendo isotérmica. O escoamento do calor entregue para amostra será feito pela placa fria. O objetivo da placa fria é formar uma blindagem térmica secundária mantendo a temperatura da amostra igual à temperatura ambiente, buscando garantir que o fluxo de calor que atravessa a amostra ocorra em uma única direção, e não saia por convecção pelas bordas da amostra. A refrigeração da placa fria será feita por um sistema de refrigeração termoelétrica composto por cinco células termoelétricas de efeito Peltier, montadas entre a placa fria e um dissipador térmico arrefecido por ventiladores, operando em temperatura levemente superior à temperatura ambiente. O sistema de refrigeração é alimentado eletricamente em corrente contínua.





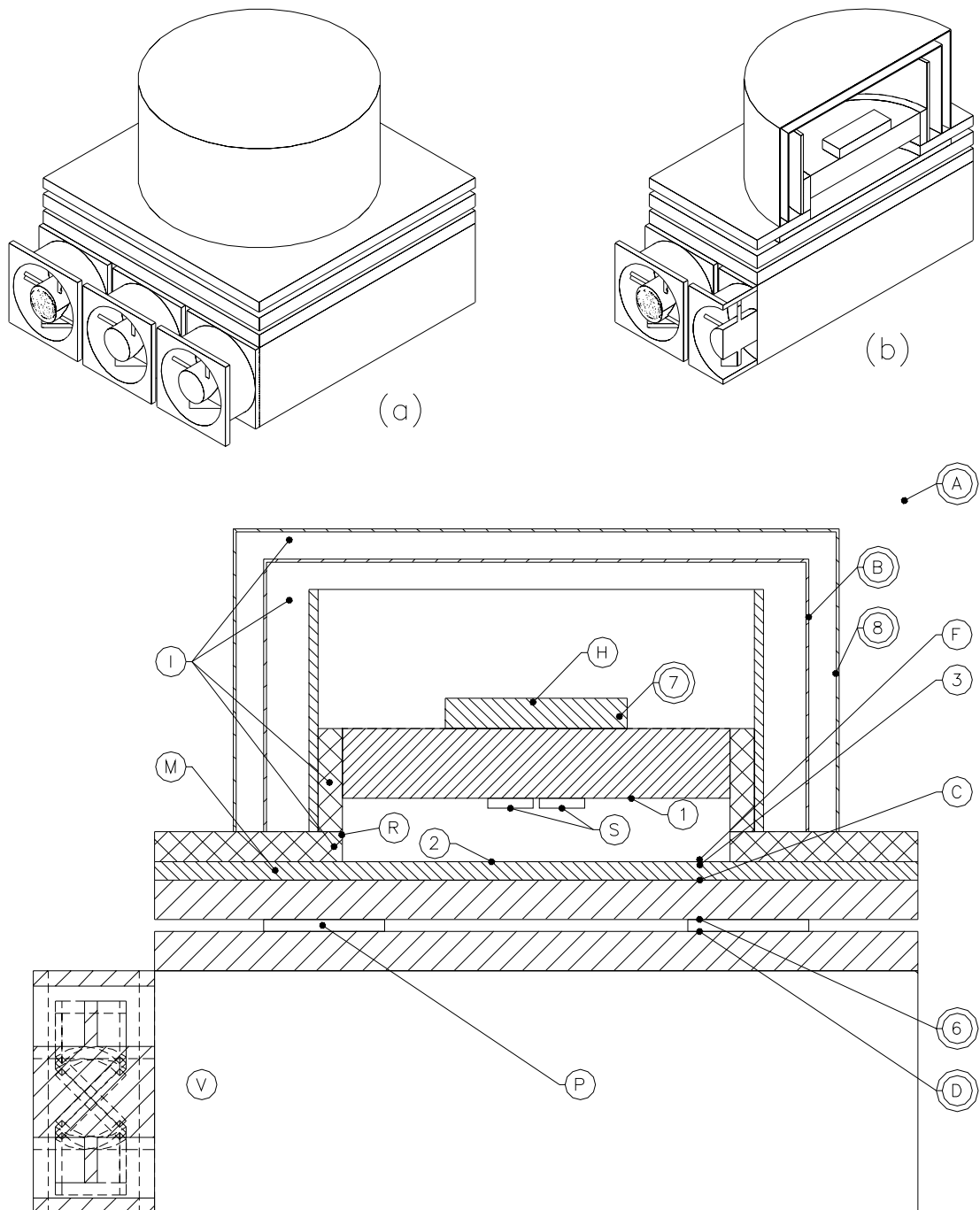
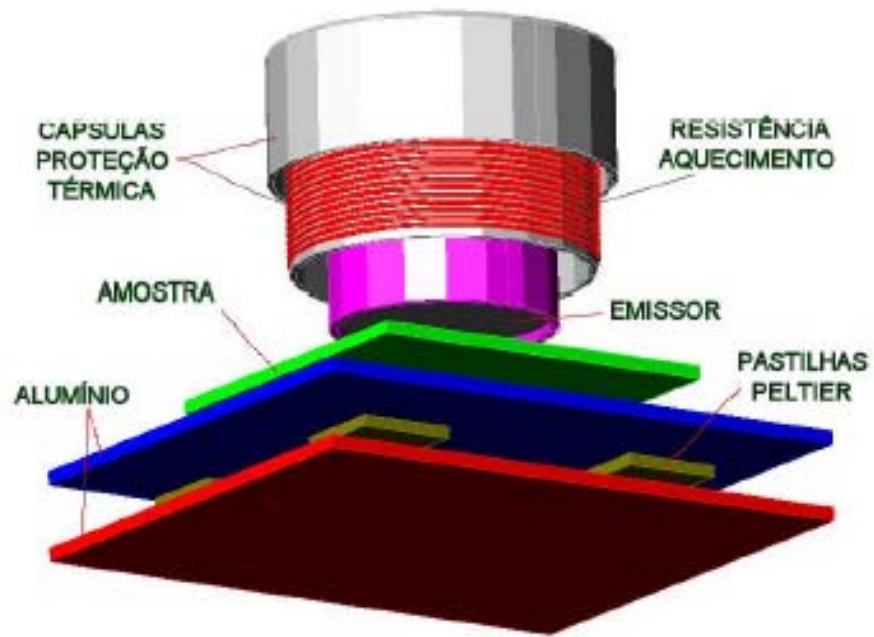


Figura 6.4. Calorímetro (a) vista geral; (b) vista geral em corte; (c) corte em detalhes – (1) superfície negra do bloco quente, (2) superfície da amostra (a ser medida emissividade), (R) superfície reirradiante, (M) amostra, (C) superfície da placa fria (junto amostra), (6) superfície placa fria (junto a célula Peltier), (7) superfície bloco quente (junto a aquecedor), (A) ambiente externo, (H) aquecedor elétrico primário, (B) aquecedor elétrico secundário (blindagem térmica), (D) superfície da célula Peltier (junto a dissipador), (P) célula Peltier, (V) dissipador térmico aletado com ventilador, (I) isolamento térmico, (S) Sensores detectores térmicos radiométricos (pastilha Peltier).



(a)



(b)



(c)

Figura 6.5. Calorímetro (a) vista explodida antes da montagem, (b) vista externa montado, (c) vista aberto com amostra de alumínio.

## 6.2. Componentes do sistema de controle e aquisição de dados

A Figura 6.6 mostra esquematicamente o calorímetro/radiômetro acoplado ao sistema auxiliar para instrumentação, controle e aquisição de dados.

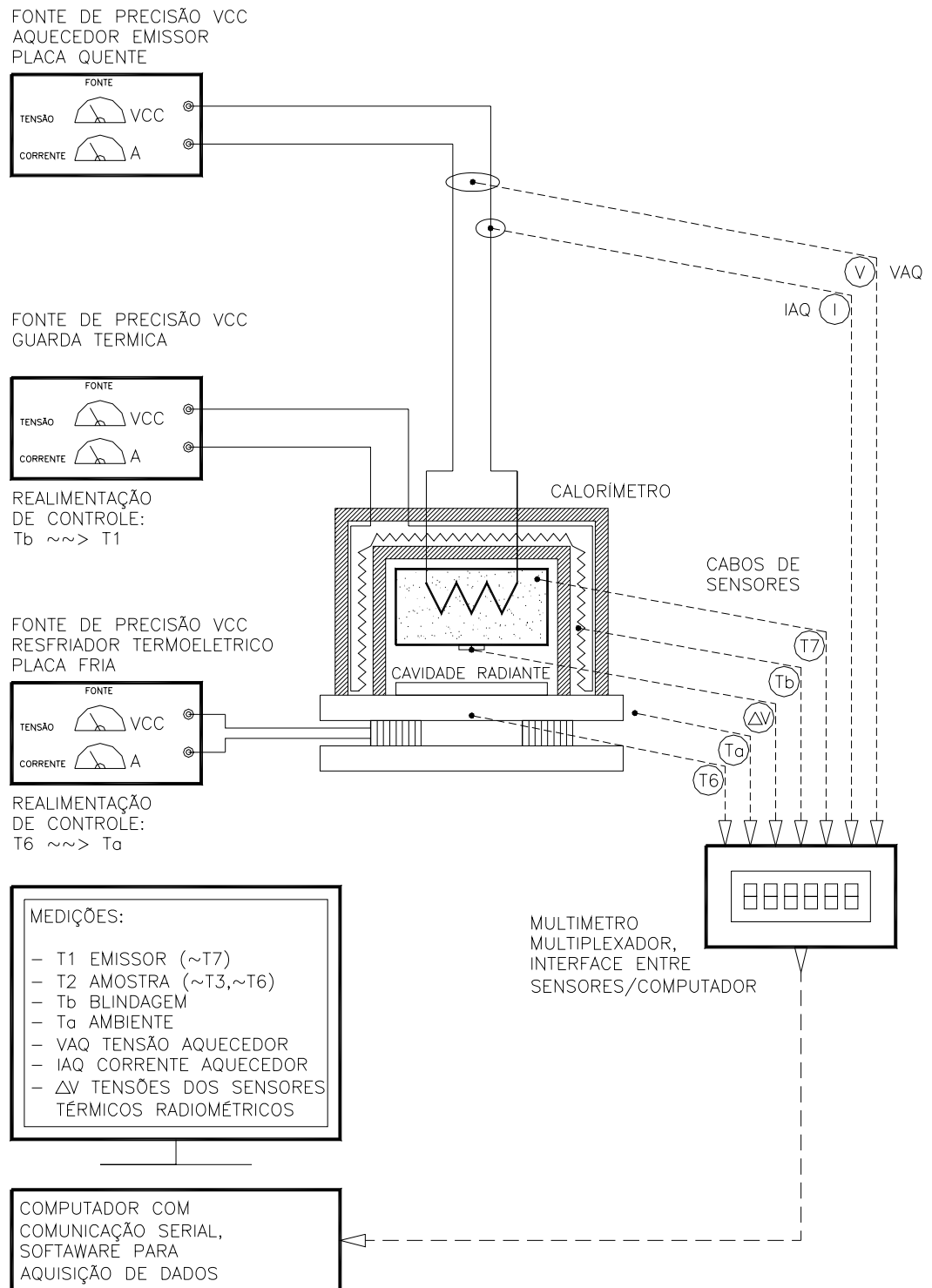


Figura 6.6. Esquema do sistema auxiliar para instrumentação, controle e aquisição de dados

### 6.2.1. Fontes de energia

O calorímetro necessita fornecimento de energia elétrica em três pontos: aquecedor primário do bloco quente emissor, aquecedor secundário da blindagem térmica, sistema de refrigeração termoelétrica. A alimentação elétrica é feita através de fontes de corrente contínua, que fornecem saída de tensão estável.

O monitoramento de tensão e corrente é feito através do mostrador da fonte e/ou multímetros externos. Os dados são coletados e armazenados no computador supervisor.

Cabe notar que a alimentação elétrica dos dois aquecedores (placa emissora e blindagem térmica) poderia ter sido feita por corrente alternada ou corrente contínua, porém adotou-se o fornecimento de energia elétrica através de fontes de corrente contínua, de maneira a minimizar a possibilidade de ruídos indesejáveis induzidos por corrente alternada. A utilização de corrente contínua também permite desprezar a indutância dos resistores utilizados para aquecimento e os utilizados para medição de indireta da corrente elétrica. O fornecimento de energia elétrica ao sistema de refrigeração termoelétrico deve ser feito obrigatoriamente com fontes de corrente contínua.

A potência elétrica recebida pelo calorímetro será fornecida por uma das fontes elétricas externas, com valores de tensão e corrente constantes. Considerando que toda potência elétrica é transformada em potência térmica na resistência elétrica do aquecedor, a potência térmica injetada no sistema será dado pela seguinte equação

$$P = V \cdot I \quad (6.1)$$

onde “P” é a potência elétrica dissipada no bloco aquecedor, “V” é a tensão elétrica da fonte de alimentação, e “I” é a respectiva corrente elétrica circulante. A Figura 6.15 apresenta as fontes de alimentação elétrica de alta precisão utilizadas. Estas possuem saída de potência ajustável e uma entrada de tensão proporcional linear de 0 a 10 VCC (conforme tabela 6.1), permitindo que se controle remotamente a saída de tensão que alimenta os aquecedores, e conseqüente a temperatura nos pontos de interesse.

Tabela 6.1. Valores da resposta da tensão de saída das fontes utilizadas, proporcionais a tensão de entrada controle.

Fonte utilizada	Local do aquecedor alimentado pela fonte	Tensão na entrada de controle da fonte	Tensão na saída de potência da fonte
Tipo 1	Bloco quente	0 a 10 VCC	Linear de 0 a 50 VCC
Tipo 2	Blindagem térmica	0 a 10 VCC	Linear de 0 a 20 VCC

## 6.2.2. Sensores

### 6.2.2.1. Sensores de temperatura

As medições de temperatura foram efetuadas através da utilização de sensores de temperatura tipo termopar.

A utilização de termopares é favorecida pelo seu baixo custo, facilidade de medição, dimensões reduzidas, e resposta rápida. A escolha do termopar normalmente depende da faixa de temperatura, da precisão desejada, e a natureza da atmosfera à qual esta sendo exposto.

Os termopares possuem dois pares de fios metálicos. Estes possuem duas extremidades, normalmente chamadas de junta fria e a junta quente. Quando as juntas das extremidades do termopar são expostas a temperaturas diferentes, ocorre a indução de uma tensão elétrica “ $\Delta V$ ” proporcional a esta diferença de temperatura “ $\Delta T$ ” entre as extremidades (efeito Seebeck). Isto é, o termopar fornece uma tensão elétrica que pode ser associada à diferença de temperatura entre as junções. Sendo assim, é necessário conhecer a temperatura da junta fria, para poder conhecer a temperatura a ser medida (a temperatura da junta quente), onde

$$T_{medida\ com\ termopar} = T_{junta\ quente} = T_{junta\ fria\ conhecida} + \Delta T(\Delta V_{medida\ entre\ junta\ fria\ e\ junta\ quente}) \quad (6.2)$$

Neste trabalho foram utilizados termopares disponíveis no Laboratório, tipo “J”, os quais inicialmente atendiam aos requisitos necessários, como a faixa de temperatura, precisão esperada, pequeno tamanho do sensor. Estes foram calibrados para melhor exatidão das medidas.

Como os termopares medem a temperatura da junção foram utilizados termopares com fios de pequeno diâmetro, minimizando o erro devido a perda ou ganho de calor por condução

pelo fio (entre a junção e a temperatura ambiente), e ainda estes foram instalados de maneira a que a junção e um trecho inicial dos fios próximo a junção ficassem expostos à mesma temperatura, diminuindo o gradiente de temperatura entre junção e a parte do fio que fica em temperatura ambiente.

As medições de temperatura foram efetuadas com termopares conectados diretamente ao multímetro do sistema de aquisição de dados, utilizando a compensação interna do instrumento para temperatura da junção fria (junta de referência).

A tabela 6.2. apresenta o limite típico de erro máximo esperado para medições com termopares tipos “J” sem seleção apurada, e com calibração prévia (onde se observa que os limites de erro podem ser diminuídos através de calibração e seleção apurada de termopares).

Tabela 6.2. Valores típicos de erro esperado (a) para termopares com fios padrões sem seleção; (b) para termopares após calibração (adaptado de Marks, 1996).

Simbologia ANSI	Materiais e polaridade		Limites de erro padrão esperado (a)	Limites de erro após calibração (b)
	Positiva	Negativo	Na faixa de 0 a 300°C	Na faixa de 0 a 60°C
Tipo “ J ”	Ferro	Constantan	2,2 °C	1,2 °C

#### 6.2.2.1.1. Aferição dos sensores de temperatura

Aferiram-se inicialmente os sensores térmicos, pois deles dependem todas as medições térmicas (temperaturas, fluxos de calor por radiação e por condução). Para aferição dos sensores de temperatura utilizou-se um banho térmico de temperatura ajustável, apresentado na Figura 6.7. Este equipamento consta basicamente em uma cuba com água, agitador para homogeneização da temperatura da água, aquecedor elétrico, acionado por controlador eletrônico de temperatura. Este banho térmico permite que se possam programar patamares fixos de temperatura.

Todos os sensores de temperatura tipo termopar foram aferidos simultaneamente com um termômetro de excelente qualidade (tipo de vidro com coluna de mercúrio, com resolução de 0,1°C), e ainda através do termômetro eletrônico do próprio banho térmico. Mergulharam-se

estes sensores, juntamente com o termômetro, em um bloco de alumínio (Figura 6.7.b), dentro da cuba com água. Calibraram-se os respectivos sensores tipo termopar na faixa de interesse deste trabalho, entre 20 e 70 °C.

Mede-se no termômetro de mercúrio a temperatura do banho térmico e respectivo valor medido por cada termopar. Registram-se os diversos dados medidos e monta-se a tabela com valores das temperaturas medidas de cada sensor para estimar as incertezas dos valores relativos, que serão utilizados durante os ensaios.



(a)



(b)



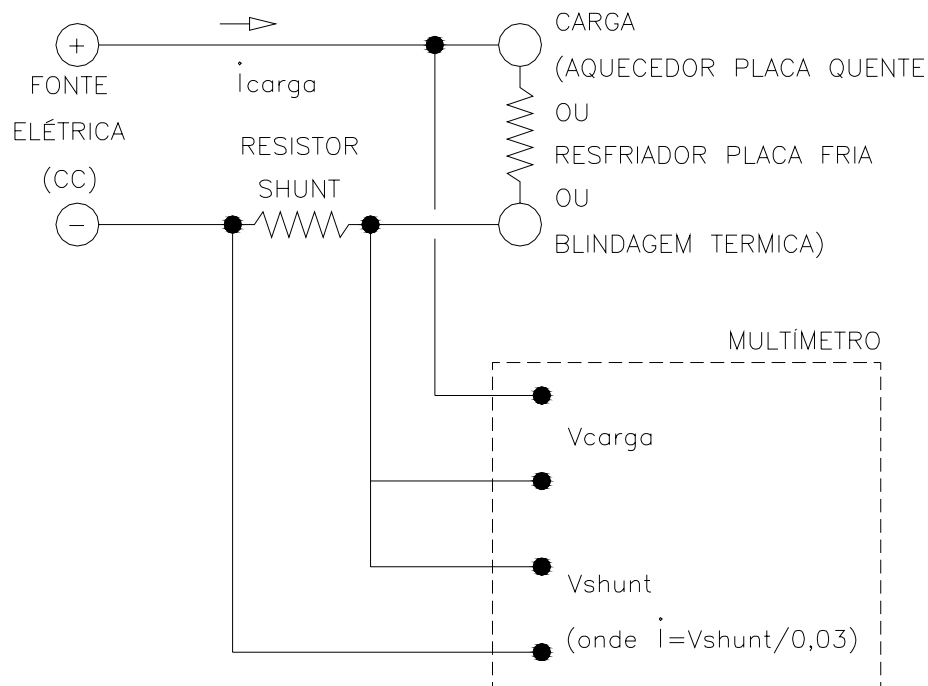
(c)

Figura 6.7. Banho termostático com controle eletrônico de temperatura para aferição de sensores de temperatura, fabricante Lauda (a) aberto desligado, (b) bloco de alumínio, (c) fechado em operação, termômetro adicional de mercúrio, sistema de aquisição de dados, calibrando sensores dentro de bloco de alumínio, dentro de banho maria

### 6.2.2.2. Sensores de corrente elétrica

Para medição de corrente elétrica foram utilizados sensores tipo resistência *shunt*. Este sensor possui uma resistência elétrica fixa e conhecida. O resistor *shunt* tem objetivo de transformar a corrente elétrica a ser medida em um sinal correspondente de tensão que é facilmente medida pelo multímetro e/ou sistema de medição. O resistor *shunt* utilizado tem especificação 0,150V / 5 A, isto quer dizer que quando este resistor é submetido a uma corrente de 5 A, produz em seus terminais uma queda de tensão de 150 mV. Indica também que a corrente máxima recomendável ao resistor *shunt* é de 5 A. Este resistor *shunt* produz em seus terminais uma variação de tensão linear com a variação de corrente numa proporção de 30 mV gerado por cada ampère circulante (0,03 V/A).

Na Figura 6.8 pode-se observar que a medição de corrente é feita de maneira indireta (através da queda de tensão no resistor *shunt*), e que a tensão efetiva sobre o aquecedor é medida após o resistor *shunt*, evitando a queda de tensão causada pelo resistor *shunt* interfira na tensão sobre a carga.



$$P_{carga} = V_{carga} \cdot \dot{I}_{carga} = V_{carga} \cdot V_{shunt} / 0,03$$

Figura 6.8. Esquema de ligação elétrica para medição de potência (tensão e corrente elétrica)



### 6.2.2.3. Sensores de fluxo de calor

Para medições de fluxo de calor utilizaram-se sensores térmicos semicondutores de efeito termoelétrico (efeito Seebeck). Estes sensores são fisicamente arranjados em paralelo, lado a lado, entre duas placas cerâmicas, formando termopilhas. Internamente os blocos semicondutores, alternadamente do tipo P e do tipo N, são eletricamente ligados em série, de maneira a somar a saída de tensão individual de cada termopar, resultando em uma saída de tensão total de maior valor.

Estes geradores termoelétricos são do mesmo tipo que as pastilhas utilizadas para refrigeração da placa fria do calorímetro, onde outro efeito termoelétrico se manifesta (efeito Peltier). Recebendo corrente contínua, produz-se uma diferença de temperatura entre as placas cerâmicas (lado frio e lado quente). Estes dispositivos são usualmente conhecidos e chamados comercialmente por “pastilhas de efeito Peltier”, porém na função de sensor de fluxo de calor utiliza-se o efeito Seebeck.

Estes geradores termoelétricos são utilizados para construção de dois tipos de sensores de fluxo de calor: um para medição de fluxo de calor unidirecional por condução e outro para fluxo de calor radiante.

#### 6.2.2.3.1. Sensores de fluxo de calor por condução

A taxa de transferência de calor prescrito sobre a amostra era conhecida baseando-se na consideração de que a guarda térmica do calorímetro garante que toda energia elétrica consumida entregue ao aquecedor é transferida através da superfície da amostra.

Para avaliar esta consideração durante os vários pontos e momentos de medição, construiu-se um fluxímetro para medição do fluxo de calor por condução em uma direção.

Este consta basicamente na montagem de um disco de plástico, e uma pastilha Peltier, dispostos entre dois discos de cobre, conforme Figura 6.9.

O fluxo de calor por condução que passa através desta montagem sanduíche, na direção normal, produz um gradiente de temperatura acentuado entre as duas faces do disco plástico central. Esta diferença de temperatura é sentida nas duas faces da pastilha Peltier gerando uma tensão elétrica proporcional a este gradiente de temperatura, que por sua vez é proporcional ao fluxo de calor. O sinal (positivo ou negativo) da tensão elétrica gerada indica o sentido do fluxo de calor.

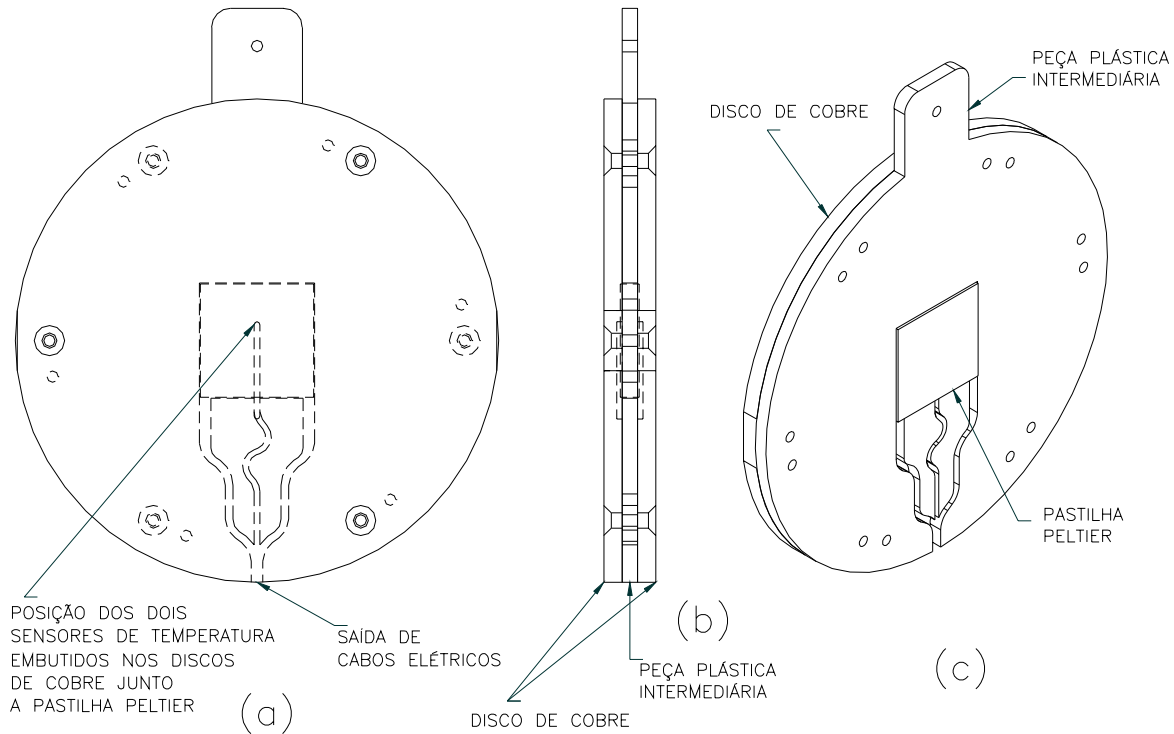


Figura 6.9. Fluxímetro de calor (a) vista frontal montado, (b) vista lateral montado, (c) vista interna desmontado (peça plástica intermediária e pastilha Peltier)

#### 6.2.2.3.2. Sensores de fluxo de calor por radiação

A radiação incidente sobre um sensor térmico causa um aumento de temperatura devido à absorção desta radiação. Em um sensor térmico termoelétrico o aumento da temperatura gera uma tensão elétrica na sua saída. Nos sensores térmicos a energia absorvida depende das propriedades radiantes (absortividade) da superfície dos mesmos. Os sensores térmicos geralmente respondem igualmente em todo o espectro da radiação térmica.

O sensor térmico radiométrico desenvolvido, pode ser visto na Figura 6.11.b. Este consta de duas termopilhas coladas lado a lado no centro da superfície quente emissora, dentro da cavidade radiante do calorímetro. Um detector é revestido pintado de preto (alta emissividade) e a outro é revestida com papel alumínio (baixa emissividade).

As saídas de tensão dos dois sensores de radiação podem ser interligadas eletricamente em polaridade inversa, de maneira que o sinal elétrico resultante diferencial gerado seja proporcional somente ao fluxo radiante, decorrente da radiosidade da amostra e das duas diferentes respostas dos sensores devido aos seus respectivos revestimentos, com diferentes valores de absortividade.

Os efeitos de outros fluxos de calor como condução e convecção que atuam sobre os sensores térmicos, podem ser desprezados. Estes fluxos de calor atuam de maneira igual nos dois sensores, porém a ligação elétrica por ser diferencial tende a descontá-los automaticamente.

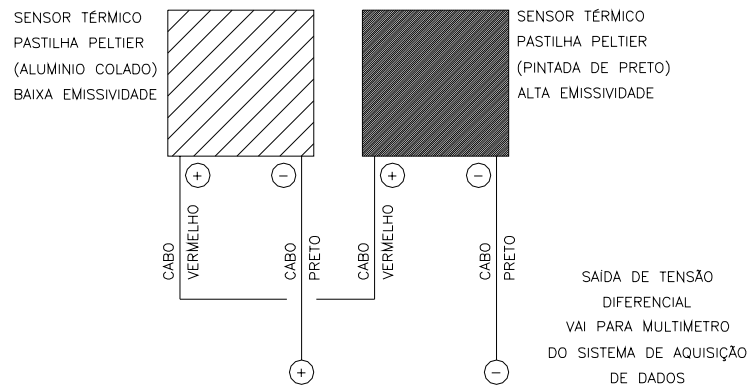


Figura 6.10. Sensores térmicos de radiação: esquema de ligação elétrica para saída de tensão diferencial



Figura 6.11. Sensores térmicos radiométricos tipo termopilha (a) pastilhas Peltier sem revestimento, (b) pastilhas Peltier, um recoberto com alumínio, outro recoberto com tinta preta, montados internamente ao calorímetro colados sobre a superfície 1 (superfície quente emissora)

A Figura 6.12 mostra que os sensores de radiação montados com suas superfícies planas paralelas a amostra, expostas em um ângulo de  $\sim 146^\circ$  ( $\sim 73^\circ$  com a normal), permitindo uma medida da emissividade hemisférica parcial da amostra, pois a integração da emissividade

direcional é feita dentro de um ângulo de  $\sim 146^\circ$  com a amostra. Sendo ainda esta medida combinada com a integração da emissividade direcional feita dentro de um ângulo de  $\sim 17^\circ$  com a superfície cilíndrica lateral revestida de alumínio.

Teoricamente, o efeito desta característica geométrica deve ser levado em conta na integração, caso se queira a medida da emissividade hemisférica total (integrada em  $180^\circ$ , no intervalo  $\theta = -90^\circ$  até  $\theta = 90^\circ$ ) e da emissividade normal ( $\theta = 0^\circ$ ), pois a emissividade direcional dos materiais tende a variar com o aumento do ângulo com a normal. Este efeito afeta de maneira diferente o resultado da integração da emissividade direcional em materiais condutores e não condutores elétricos. Este comportamento pode ser visto no anexo A1, Figuras A1.4., A1.5, onde vê-se que, tipicamente, em materiais condutores elétricos, a emissividade direcional aumenta com o aumento do ângulo com a normal, enquanto que para materiais não condutores elétricos, a emissividade direcional diminui com o aumento do ângulo com a normal.

Neste trabalho, estes efeitos direcionais são desprezados nos cálculos efetuados, e considera-se que através da calibração do instrumento, os resultados médios para os valores medidos de emissividade hemisférica são pouco afetados por esta simplificação.

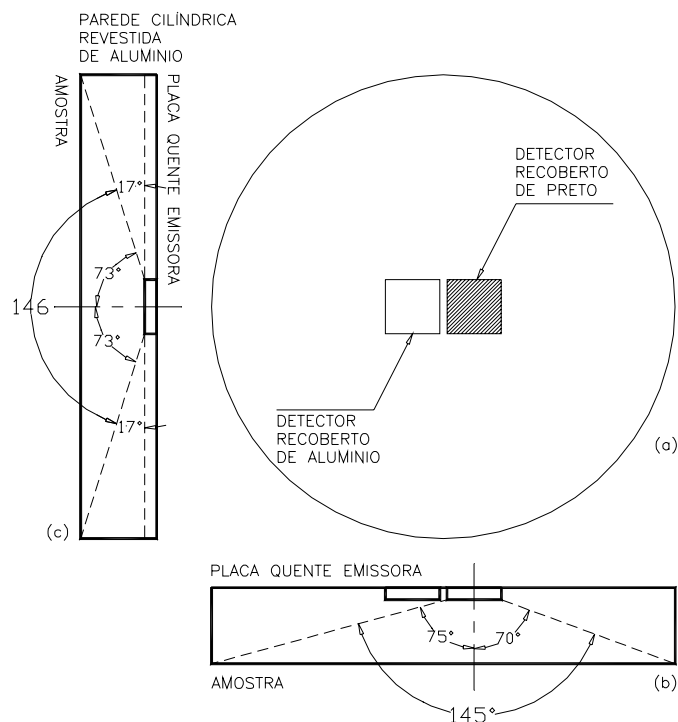


Figura 6.12. Sensores térmicos de radiação montados no interior da cavidade radiante do calorímetro (a) vista superior, (b) vista lateral 1, (c) vista lateral 2

### 6.2.3. Sistema de controle de temperatura

Para que o experimento ocorra dentro de parâmetros pré-estabelecidos, faz-se necessário o controle de temperatura basicamente em três partes do calorímetro, no bloco quente emissor, na guarda térmica e na placa fria.

Quanto à operação, o experimento se desenvolve em duas fases: pré-aquecimento do calorímetro (regime transiente), e a medição propriamente dita após ser atingido o equilíbrio térmico (regime permanente).

Durante as medições, o controle de temperatura ocorre de duas maneiras: realimentação automática e/ou realimentação manual.

Nos momentos de controle manual a temperatura do ponto de interesse é observada pelo experimentador, e este atua sobre a fonte de alimentação, mudando a tensão de saída elétrica, até que o sistema atinja a temperatura de equilíbrio desejada.

Para os momentos de controle automático, utilizaram-se controladores eletrônicos microprocessados programáveis (Figura 6.13.). Estes controladores possuem basicamente um mostrador frontal para visualização e parametrização, e conectores elétricos na parte traseira. A régua de conectores possui uma entrada para o sensor de temperatura (termopar tipo J) e uma saída de controle proporcional analógica de 0 a 10 VCC. Esta saída de controle realimenta proporcionalmente a entrada da fonte de alimentação elétrica fazendo com que a potência de saída da fonte diminua até encontrar o ponto de equilíbrio. Quando o ponto de equilíbrio térmico é atingido o controlador modula o sinal de saída, fazendo que a temperatura no ponto de interesse fique muito próxima ao valor previamente ajustado no controlador. A utilização de controladores microprocessados permite atingir o regime permanente, de maneira mais rápida e estável.

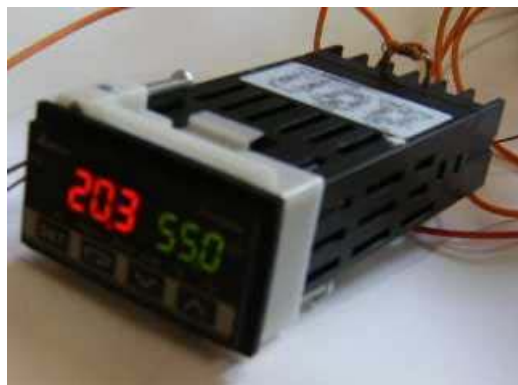


Figura 6.13. Controlador eletrônico de temperatura

O bloco quente emissor deve atingir, em regime permanente, uma temperatura final próxima a 55 °C.

A temperatura da guarda térmica deve obrigatoriamente tender à temperatura do bloco quente emissor, sendo para isto realimentada por sensores tipo termopar ligados de maneira a medir a temperatura diferencial entre os dois pontos (aquecedor emissor e guarda térmica).

A temperatura da placa fria deve obrigatoriamente tender à temperatura do ambiente, sendo para isto realimentada por sensores tipo termopar ligados de maneira a medir a temperatura diferencial entre os dois pontos (placa fria e temperatura ambiente).

#### 6.2.4. Multímetro e interface multiplexada

Para coleta e armazenamento das medidas efetuadas é necessário que os sinais elétricos dos sensores tipo termopar, tensão e corrente elétrica consumida pela fonte que alimenta o aquecedor sejam conectados ao computador. Para isto se faz necessário uma interface entre computador e sensores. Faz-se esta aquisição de dados através de um multímetro de alta precisão, 6 ½ dígitos, alta estabilidade, e filtros para rejeição de ruídos, fabricante Agilent, modelo 34970A (Figura 6.14.a). Este possui como interface porta de saída para comunicação serial RS-232. Possui compatibilidade com comandos *SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments)*, para comunicação com programa externo para aquisição de dados. Todos os sensores são conectados numa interface multiplexadora (cartão conectado ao multímetro com uma régua de conectores elétricos e relés, que permitem que o multímetro faça as respectivas medidas em um canal de cada vez) (Figura 6.14.b).



(a)



(b)

Figura 6.14. Sistema de aquisição de dados (a) multímetro com interface multiplexada, (b) cartão de conexões da placa de aquisição de dados

### 6.2.5. Computador e programa supervisor

A visualização das medidas efetuadas pode ser vistas no mostrador incorporado ao gabinete da própria interface, ou ainda no computador supervisor (Figura 6.15).

Para gerenciamento destas medições foi utilizado computador tipo IBM-PC, com porta de comunicação serial compatível com o respectivo multímetro. As seleções das diversas medições (como a escolha do canal, da faixa, da unidade, do tipo de medição, tempo entre medidas), são feitas através de comandos de programa específico, desenvolvido em linguagem Qbasic Microsoft, que utiliza comandos de programa padrão compatível *SCPI* (Agilent, 1999).

O programa desenvolvido na linguagem Qbasic tinha por função principal efetuar medidas básicas e armazenar em disco rígido, para posterior tratamento, análise, manipulação matemática e gráfica. Simultaneamente apresenta em tela as medidas diretas efetuadas (temperaturas, corrente e tensão elétrica), potências, fluxos de calor, parâmetros de operação; e a emissividade como medida final resultante. Utilizaram-se também programas comerciais como Excel para produção de planilhas, *Grapher* para produção de gráficos, *EES* e *IHT* para análise de incertezas, avaliação do comportamento e análise de sensibilidade dos modelos matemáticos utilizados.



Figura 6.15. Computador supervisor e fontes elétricas durante medições

### 6.3. Fluxos de energia e princípios do calorímetro

No caso ideal, a consideração principal do calorímetro é de que o calor entregue pelo aquecedor elétrico de potência conhecida seja na sua totalidade entregue à superfície negra da cavidade radiante, e que, por sua vez, esta potência seja entregue na sua totalidade à superfície da amostra da qual se deseja conhecer a emissividade. As Figuras 6.16 e 6.17 apresentam esquematicamente os caminhos dos fluxos parciais e totais de energia do dispositivo que serão considerados para desenvolvimento do modelo matemático do dispositivo.

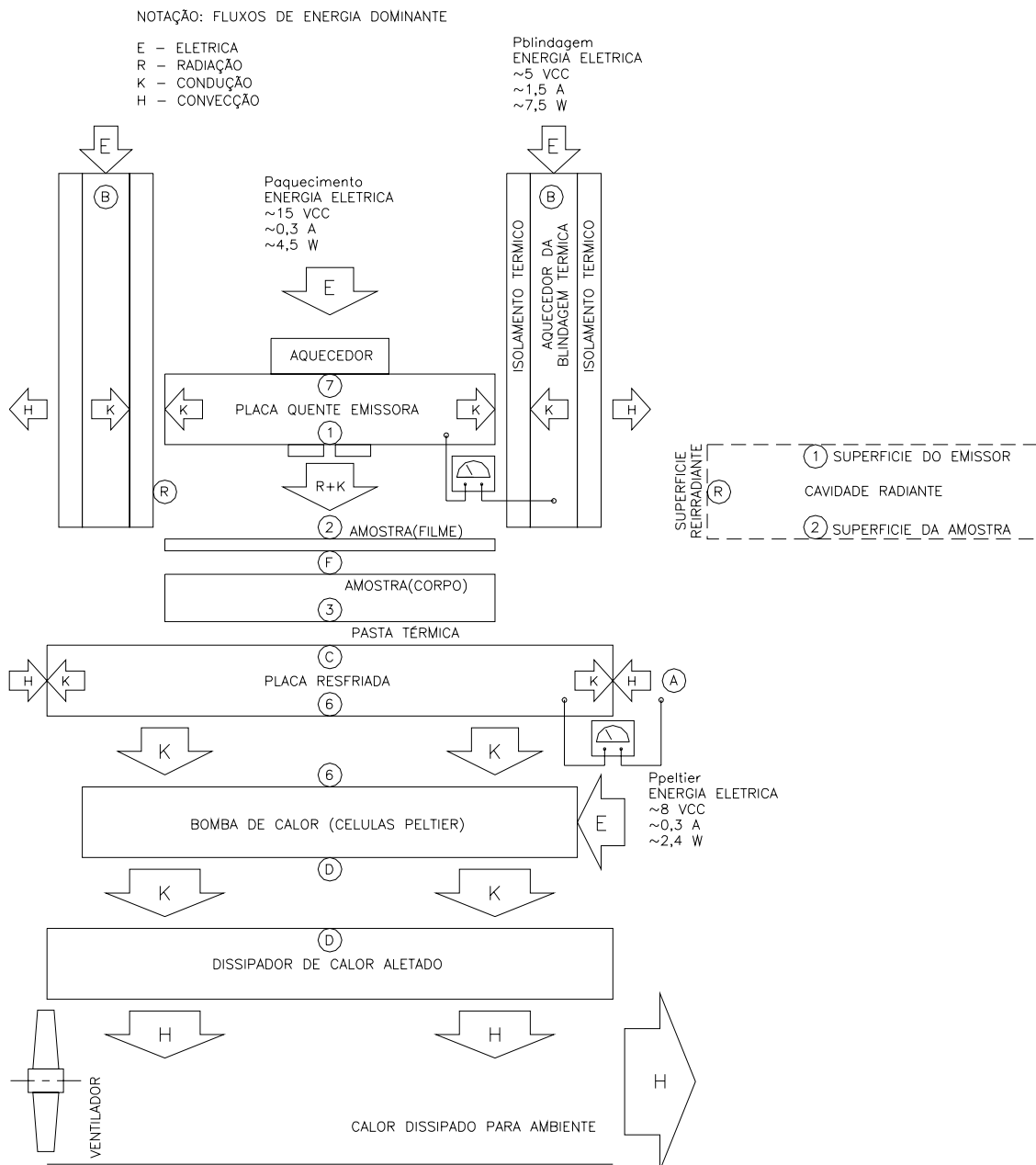


Figura 6.16. Esquema do calorímetro: fluxos de energia térmica e elétrica



NOTAÇÃO: FLUXOS DE ENERGIA DOMINANTE

E – ELETRICA  
R – RADIAÇÃO  
K – CONDUÇÃO  
H – CONVECÇÃO

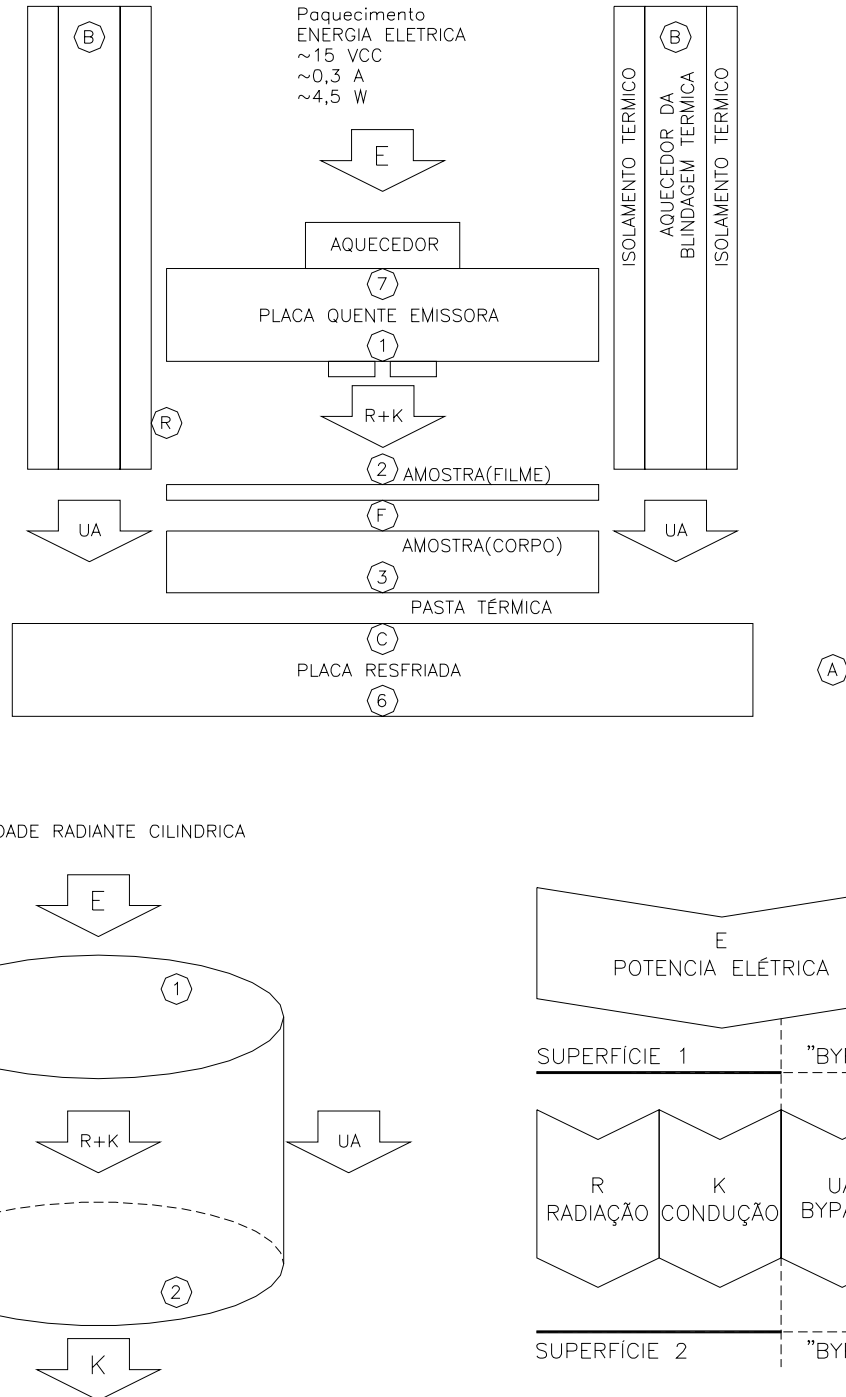


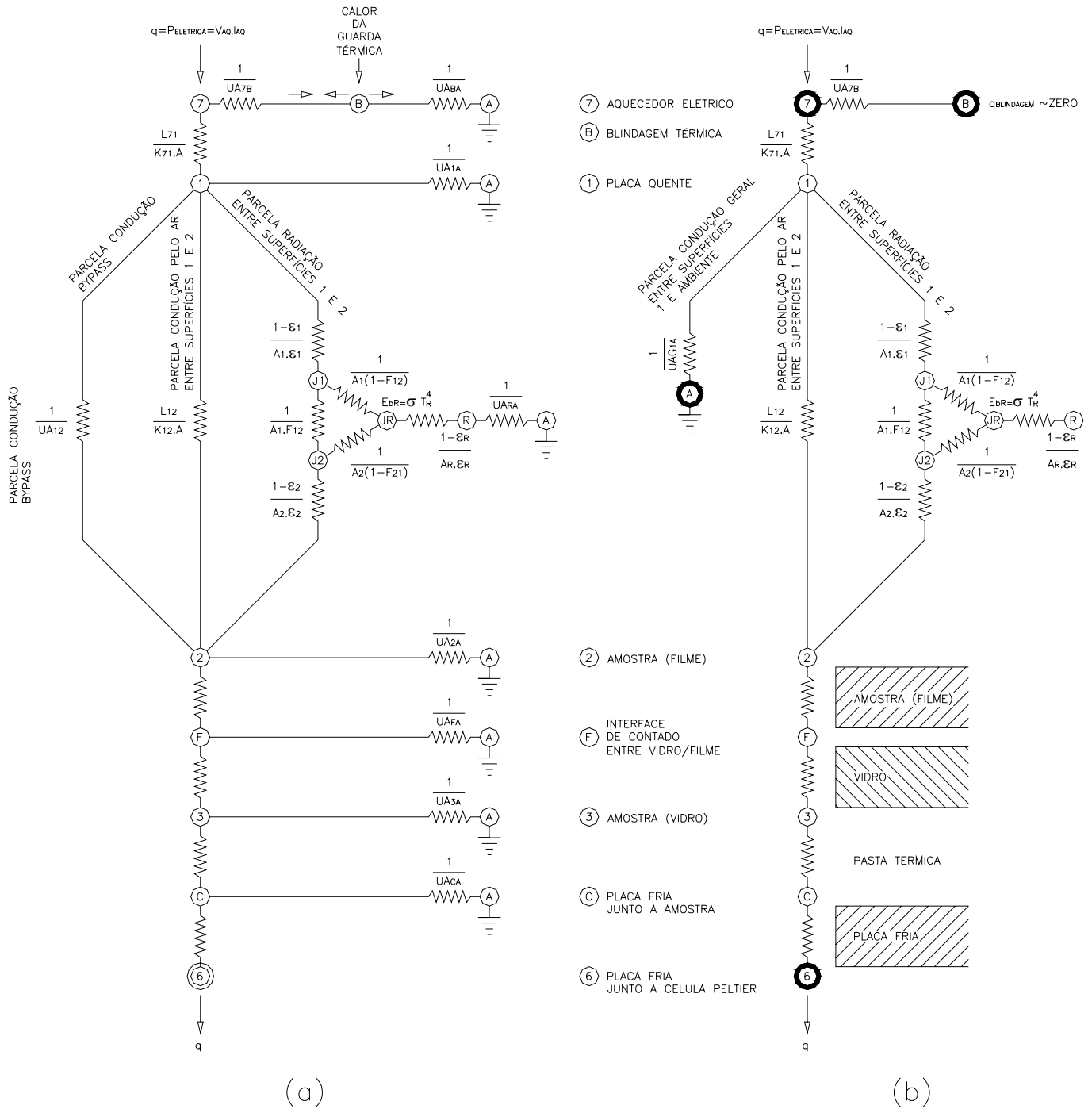
Figura 6.17. Fluxos parciais de energia – apenas na cavidade cilíndrica – parâmetros funcionais utilizados no modelo matemático

### 6.3.1. Dimensões e propriedades físicas dos componentes do equipamento

A Figura 6.18 representa o circuito térmico equivalente do calorímetro desenvolvido. A Tabela 6.3 apresenta os parâmetros dimensionais e propriedades termofísicas consideradas válidas no desenvolvimento do modelo matemático do equipamento medidor de emissividade.

Tabela 6.3. Dimensões e propriedades termofísicas dos componentes do equipamento

a. Dimensões básicas da cavidade radiante e respectivas incertezas: $r_1=r_2=0,064\pm 0,0005$ m, distância $L_{12}=0,021\pm 0,0005$ m, resulta em área $A=A_1=A_2=0,012868\pm 0,000201$ m <sup>2</sup> , $A_R=0,008445\pm 0,00021$ m <sup>2</sup> , e
b. Fatores de forma para as três superfícies da cavidade radiante: $F_{11}=F_{22}=0$ , $F_{12}=F_{21}=0,7213\pm 0,0058$ , $F_{1R}=F_{2R}=0,2786\pm 0,0058$ .
c. Superfície quente emissora (1): Material alumínio, superfície plana circular com diâmetro $d_1=0,0128$ m, área "A <sub>1</sub> ", espessura do bloco $L_{71}=0,023$ m, condutividade térmica $k_{71}=204$ W/m.K, superfície emissora com tinta preta fosca sobre alumínio com valor de emissividade hemisférica $\varepsilon_1=0,88$ .
d. Superfície lateral reirradiante (R): Parede cilíndrica revestida em papel alumínio, área $A_R=0,008445$ m <sup>2</sup> , emissividade hemisférica do papel alumínio $\varepsilon_R=0,05$ .
e. Superfície do filme da amostra (2) para determinação da emissividade hemisférica: superfície plana circular com diâmetro $d_2=0,0128$ m, área útil exposta "A <sub>2</sub> ", de materiais, espessuras diversas (ver filmes das amostras).
f. Corpo da amostra (F3): Material vidro, área útil "A", espessura $L_{F3}=0,006$ m, condutividade térmica $k_{F3}=0,917$ W/m.K, emissividade hemisférica do vidro (quando sem filme) $\varepsilon_2=0,84$ .
g. Placa fria (C6): Material alumínio, área útil "A", espessura da placa $L_{C6}=0,013$ m, condutividade térmica $k_{C6}=204$ W/m.K.
h. Cavidade radiante (superfícies 1, 2, R) preenchida internamente com ar, com área normal ao fluxo de calor "A", espessura de ar = $L_{12}=0,021$ m, e condutividade térmica (conforme $T_1$ e $T_2$ , interpolado linearmente entre 0,0263 W/m.K (a 300 K) e 0,030 W/m.K (a 350 K)).
i. Isolamento térmico com poliuretano e espuma elastomérica com condutividade térmica fixadas no seguinte valor $k_{ISOLAMENTO}=0,035$ W/m.K.
j. Sensores de radiação tipo pastilhas Peltier (termopilha), dimensões 15 x 15 x 3,3 mm, fabricante Danvic, sendo uma pastilha com superfície de baixa emissividade (revestida com papel alumínio colado), e outra pastilha com superfície alta emissividade (pintada de tinta preta fosca).



- $\frac{1}{UA_{mn}}$  RESISTÊNCIA TÉRMICA GLOBAL TRIDIMENSIONAL (AXIAL E RADIAL) ENTRE SUPERFÍCIES "m" E "n"
- $\frac{L_{mn}}{K_{mn} \cdot A}$  RESISTÊNCIA TÉRMICA CONDUÇÃO UNIDIMENSIONAL ENTRE SUPERFÍCIES "m" E "n"
- #** PONTO DE MEDIDA DIRETA DE TEMPERATURA COM TERMOPAR "#"

Figura 6.18. Modelo do calorímetro, representação do circuito térmico correspondente, (a) circuito completo; (b) circuito simplificado pelo fator-UAG determinado experimentalmente (bypass indesejável)

#### 6.4. Modelo matemático desenvolvido

Para o desenvolvimento do modelo matemático, são consideradas aplicáveis as simplificações apresentadas anteriormente no item 4.2 "Troca de radiação em cavidade radiante fechada", e ainda simplificações e considerações adicionais como:

- Medições serão efetuadas quando o sistema atingir o regime permanente;
- Propriedades térmicas dos materiais são consideradas constantes e independentes da temperatura (exceto a condutividade térmica do ar no interior da cavidade);
- Foram desconsiderados os efeitos espectrais e direcionais das trocas térmicas por radiação;
- Foi considerado que a blindagem térmica é ideal ( $q = 0$ , isolamento térmico perfeito);
- É considerada somente a transferência de calor por condução unidirecional através do ar no interior da cavidade;
- O ar é considerado não-participante nas trocas de calor por radiação;
- A transferência de calor por convecção natural no ar dentro da cavidade é desprezada, considerando que o ar fique parado (termicamente estratificado, ar quente acima junto ao bloco quente emissor e o ar frio embaixo junto a amostra arrefecida);
- Desprezando ainda a convecção natural no ar junto a parede cilíndrica vertical interna da cavidade;
- O valor da condutividade térmica do ar é interpolada linearmente entre as temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ , no interior da cavidade,  $k=k(T)$ ;
- A troca de calor por condução entre as superfícies, nas arestas de junção das superfícies é desprezada;
- É desprezado o efeito de sombreamento causado pelos sensores detectores térmicos de radiação no interior da cavidade.

E ainda para o método radiométrico:

- Admite-se que estas considerações citadas também são válidas e aplicáveis à superfície dos sensores detectores térmicos de radiação;
- Considera-se que, com a utilização de dois sensores detectores térmicos de radiação (um preto e outro com alumínio) ligados eletricamente em série de maneira diferencial (polaridade inversa), é desprezível o efeito sobre os sensores da parcela de transferência de calor por condução do ar.

### 6.4.1. Modelo matemático para o método calorimétrico

As distorções ocasionadas por estas simplificações, sinalizam que se pode esperar discrepância do modelo matemático puramente teórico com as medições experimentais a serem efetuadas.

Neste modelo propõe-se agrupar estes efeitos e distorções em uma constante do calorímetro a ser determinada experimentalmente.

O modelo matemático desenvolvido utiliza as equações de fluxo de calor em regime permanente combinando as parcelas de transferência de calor, por radiação e por condução (no interior da cavidade radiante), combinada com parcela transferência de calor “bypass” indesejável (que ocorre “por fora” da cavidade radiante).

A Figura 6.18 representa o circuito térmico equivalente do calorímetro, e a Tabela 6.3 apresenta os parâmetros e propriedades considerados.

A taxa de transferência de calor total “ $q_{t12}$ ” pode ser calculada através da soma destas três parcelas

$$q_{t,1,2(total)} = q_{lr,1,2(radiação)} + q_{c,1,2(condução)} + q_{bp,1,2(bypass)} \quad (6.3)$$

A taxa de transferência de calor líquida por radiação “ $q_{lr12}$ ”, no interior da cavidade, entre a superfície 1 (superfície emissora quente) e a superfície 2 (superfície da amostra), conforme equações eq. 2.10 e eq. 4.20, é dada por

$$q_{lr,1,2} = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{(1 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{(1 - \varepsilon_2)}{\varepsilon_2 A_2} + \frac{1}{\left[ \left( \frac{1}{A_1 F_{1R}} \right) + \left( \frac{1}{A_2 F_{2R}} \right) \right]}} \quad (6.4)$$

A taxa de transferência de calor unidirecional por condução “ $q_{c12}$ ” através do ar, no interior da cavidade, entre as superfícies 1 e 2, conforme eq. 4.21, é dada por

$$q_{c,1,2} = \frac{k_{12} \cdot A \cdot (T_1 - T_2)}{L_{1,2}} \quad (6.5)$$

onde  $T_1$ ,  $T_2$ , são as temperaturas das superfícies 1 e 2, em [K];

A taxa de transferência de calor global indesejável bypass “ $q_{bypass}$ ” pretende englobar os efeitos combinados do conjunto de considerações e simplificações funcionais que são utilizadas neste experimento.

Propõe-se então que estes indesejáveis e complexos fluxos de calor unidirecionais e tridimensionais, que ocorrem dentro do calorímetro, possam ser modelados e concentrados em uma constante de calibração geral do calorímetro “fator  $UAG_{CALORIMETRO}$ ”, a ser determinada a partir de medições experimentais com diversas amostras com valores de emissividade conhecidos.

Para isto considera-se que estes fluxos de calor indesejáveis “bypass” ocorrem somente entre duas zonas de interesse, em temperaturas conhecidas  $T_1$  (a temperatura da placa quente) e  $T_A$  (a temperatura ambiente).

Com intuito de se manter válida e única esta constante de calibração geral do calorímetro – “fator  $UAG_{CALORIMETRO}$ ”, o dispositivo experimental prevê ser possível controlar e manter a temperatura da amostra na mesma temperatura ambiente, através do resfriamento da placa fria, isto é, fazer  $T_2 = T_A$ .

Sendo assim, a taxa de transferência de calor indesejável bypass “ $q_{bypass}$ ” pode ser calculada através da seguinte equação

$$q_{bypass,1,A} = UAG_{1,A} \cdot (T_1 - T_A) \quad [W] \quad (6.6)$$

onde  $T_1$ ,  $T_A$ , são as temperaturas da superfície 1 e do ambiente, em [K];  $UAG_{1,A}$  é a constante de calibração geral experimental do calorímetro, válida para temperaturas entre a superfície 1 e o ambiente.

Como o dispositivo permite controlar a temperatura da amostra, de maneira que  $T_2$  seja igual a temperatura ambiente, pode-se dizer que

$$q_{bypass,1,A} = q_{bypass,1,2} = UAG_{1,2} \cdot (T_1 - T_2) \quad [W] \quad (6.7)$$

Como se viu anteriormente, a potência elétrica de aquecimento “ $P_{AQ}$ ” injetada no calorímetro será dado pela seguinte equação

$$q_{t,1,2} = P_{AQ} = V_{AQ} \cdot I_{AQ} \quad (6.8)$$

onde “ $P_{AQ}$ ” é a potência elétrica dissipada no bloco quente emissor, “ $V_{AQ}$ ” é a tensão elétrica da respectiva fonte de alimentação, “ $I_{AQ}$ ” é a respectiva corrente elétrica consumida, calculada pela tensão correspondente sobre o resistor *shunt*.

Substituindo na equação 6.3 as respectivas parcelas resulta na equação 6.9 que é a equação base do modelo matemático do método calorimétrico

$$V_{AQ} \cdot I_{AQ} = \frac{\sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{(1 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12} + \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{F_{1R}}\right) + \left(\frac{1}{F_{2R}}\right)\right]}} + \frac{(1 - \varepsilon_2)}{\varepsilon_2}} + \frac{k_{12} \cdot A \cdot (T_1 - T_2)}{L_{1,2}} + UAG_{1,2} \cdot (T_1 - T_2) \quad (6.9)$$

Na Figura 6.18, observa-se que a partir da temperatura  $T_6$  (medida primária feita diretamente pelo sistema de medição), encontra-se a temperatura sobre a superfície da amostra  $T_2$  que pode ser calculada através do fluxo de calor, que atravessa o filme (2F), a superfície de contato (FF'), o vidro (F3), a superfície de contato (3C) e a placa fria (C6), com a seguinte equação

$$T_2 = T_6 + \frac{[V_{AQ} \cdot I_{AQ} - UAG_{12} \cdot (T_1 - T_2)]}{A} \cdot \left( \frac{L_{2F}}{k_{2F}} + Rt_{FF'} + \frac{L_{F'3}}{k_{F'3}} + Rt_{3C} + \frac{L_{C6}}{k_{C6}} \right) \quad (6.10)$$

As interfaces de contato "FF'" e "3C" foram preenchidas com fino filme de água. Neste modelo consideraram-se desprezíveis as resistências de contato.

A condutividade térmica unidirecional do ar  $k_{12}$  é calculada em função da temperatura média do ar dentro da cavidade, conforme Tabela 6.3.h, interpolada linearmente através da equação 6.11

$$k_{12} = 0,030 - \left[ 350 - \frac{(T_1 + T_2)}{2} \right] \cdot \frac{0,0037}{50} \quad [\text{W/m.K}] \quad (6.11)$$

onde  $T_1$ ,  $T_2$ , são as temperaturas das superfícies 1 e 2, em [K];

Combinando as equações 6.9, 6.10 e 6.11, tem-se o modelo matemático geral do calorímetro, dependente apenas das 4 variáveis primárias medidas  $T_1$ ,  $T_6$ ,  $V_{AQ}$ ,  $I_{AQ}$ . A Figura 6.18.b representa o circuito térmico equivalente deste modelo.

A partir de dados apresentados na tabela 6.3, e amostra de emissividade conhecida " $\varepsilon_2$ ", determina-se então experimentalmente, através de calibração, o parâmetro constante do calorímetro  $UAG_{12}=0,0783\pm 0,0069$  W/K.

Reordenando os termos da equação 6.9, utilizando os parâmetros apresentados na Tabela 6.3, e ainda o parâmetro determinado experimentalmente  $UAG_{12}$ , tem-se a equação particular do calorímetro desenvolvido

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{\frac{7,29667 \times 10^{-10} \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{V_{AQ} \cdot I_{AQ} - (k_{12} \cdot 0,612762 + 0,07828) \cdot (T_1 - T_2)} - 0,2982617} \quad (6.12)$$

onde  $T_1, T_2$ , são as temperaturas das superfícies 1 e 2, em [K].

#### 6.4.2. Modelo matemático para o método radiométrico

O sinal de tensão diferencial dos sensores radiométricos " $\Delta V$ " é proporcional ao fluxo de calor radiante líquido entre as superfícies 1 e 2 " $q_{lr12}$ ". Na faixa de medições, pode-se assumir que esta relação de proporcionalidade é representada por uma reta que passa pela origem, eq. 6.13, conforme resultados de experimentos similares apresentadas por Snyder, Gier, Dunkle (1955), descritos no item 5.1.2 (apud Holman, 2001), e Krenzinger (2006).

$$q_{lr,1,2} = CPR \cdot \Delta V \quad (6.13)$$

A validação desta consideração também foi observada nos experimentos e medidas efetuadas neste trabalho.

A taxa de transferência de calor líquida por radiação " $q_{lr12}$ ", no interior da cavidade, entre a superfície 1 (superfície emissora quente) e a superfície 2 (superfície da amostra), conforme equações eq. 2.10 e eq. 4.20, e considerando que  $A_1=A_2=A$ , tem-se

$$q_{lr,1,2} = \frac{\sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{(1 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12} + \frac{1}{\left[ \left( \frac{1}{F_{1R}} \right) + \left( \frac{1}{F_{2R}} \right) \right]}} + \frac{(1 - \varepsilon_2)}{\varepsilon_2}} \quad (6.14)$$



onde  $T_1$ ,  $T_2$ , são as temperaturas das superfícies 1 e 2, em [K]; parâmetros fixos são apresentados na Tabela 6.3; e CPR é a constante de proporcionalidade radiométrica, reagrupando tem-se

$$CPR \cdot \Delta V = q_{lr,1,2} = \frac{\sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{(1 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12} + \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{F_{1R}}\right) + \left(\frac{1}{F_{2R}}\right)\right]}} + \frac{(1 - \varepsilon_2)}{\varepsilon_2}} \quad (6.15)$$

ou ainda

$$\frac{\Delta V}{(T_1^4 - T_2^4)} = \frac{\sigma \cdot A}{CPR} \left\{ \frac{1}{\frac{(1 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12} + \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{F_{1R}}\right) + \left(\frac{1}{F_{2R}}\right)\right]}} + \frac{(1 - \varepsilon_2)}{\varepsilon_2}} \right\} \quad (6.16)$$

Utilizando ainda os parâmetros fixos apresentados na Tabela 6.3, tem-se a equação geral deste radiômetro

$$\frac{\Delta V}{(T_1^4 - T_2^4)} = \frac{7,2965 \cdot 10^{-10}}{CPR} \cdot \left\{ \frac{1}{0,298 + \frac{1}{\varepsilon_2}} \right\} \quad (6.17)$$

Para cálculo da temperatura  $T_1$  e  $T_2$ , utiliza-se a consideração de que o fluxo de calor líquido radiante combinado com o fluxo de calor por condução no ar, no interior da cavidade, é igual ao fluxo de calor por condução que atravessa a amostra entre os pontos 2 e 6, conforme eq. 6.18

$$q_{lr,1,2}(\text{radiação}) + q_{c,1,2}(\text{condução}) = q_{c,2,6}(\text{condução}) \quad (6.18)$$

A temperatura da superfície do bloco quente " $T_1$ " é considerada muito próxima da temperatura " $T_7$ ", pois o bloco tem pequena espessura e alta condutividade térmica, isto é  $T_1 \approx T_7$ .

Então, da eq. 6.18, chega-se à seguinte equação para o cálculo da temperatura  $T_2$

$$\frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{(1 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12} + \frac{1}{[(\frac{1}{F_{1R}}) + (\frac{1}{F_{2R}})]}} + \frac{(1 - \varepsilon_2)}{\varepsilon_2}} + \frac{k_{12} \cdot (T_1 - T_2)}{L_{1,2}} = \frac{T_2 - T_6}{\left( \frac{L_{2F}}{k_{2F}} + \frac{L_{F3}}{k_{F3}} + \frac{L_{C6}}{k_{C6}} \right)} \quad (6.19)$$

onde as resistências de contato térmico entre os pontos 2 e 6 são desprezadas. A condutividade térmica unidirecional do ar  $k_{12}$  é calculada em função da temperatura média do ar dentro da cavidade, interpolada linearmente entre 300 e 350 K, através da equação 6.11.

Combinando as equações 6.11, 6.17 e 6.19, tem-se o modelo matemático geral do radiômetro, dependente apenas das três variáveis primárias medidas temperaturas  $T_1$ ,  $T_6$ , e tensão dos sensores de radiação  $\Delta V$ .

A partir da calibração com amostra de emissividade conhecida é determinado experimentalmente o valor da constante de proporcionalidade radiométrica  $CPR=0,977 \pm 0,049$  W/mV.

Desta forma, utilizando os parâmetros fixos apresentados na Tabela 6.3, e ainda o parâmetro determinado experimentalmente CPR, tem-se a equação particular do radiômetro desenvolvido para medição da emissividade

$$\frac{\Delta V}{(T_1^4 - T_2^4)} = 7.46766 \cdot 10^{-10} \cdot \left\{ \frac{1}{0,298263 + \frac{1}{\varepsilon_2}} \right\} \quad (6.20)$$

Reordenando os termos da equação 6.20, tem-se

$$\varepsilon_2 = \left\{ \frac{1}{7.46766 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{\Delta V} - 0,298263} \right\} \quad (6.21)$$

onde a tensão diferencial dos sensores radiométricos " $\Delta V$ " é medido em mV, e a temperaturas do emissor " $T_1$ " e da amostra " $T_2$ " em K. A Figura 6.19 apresenta o gráfico da equação 6.20.

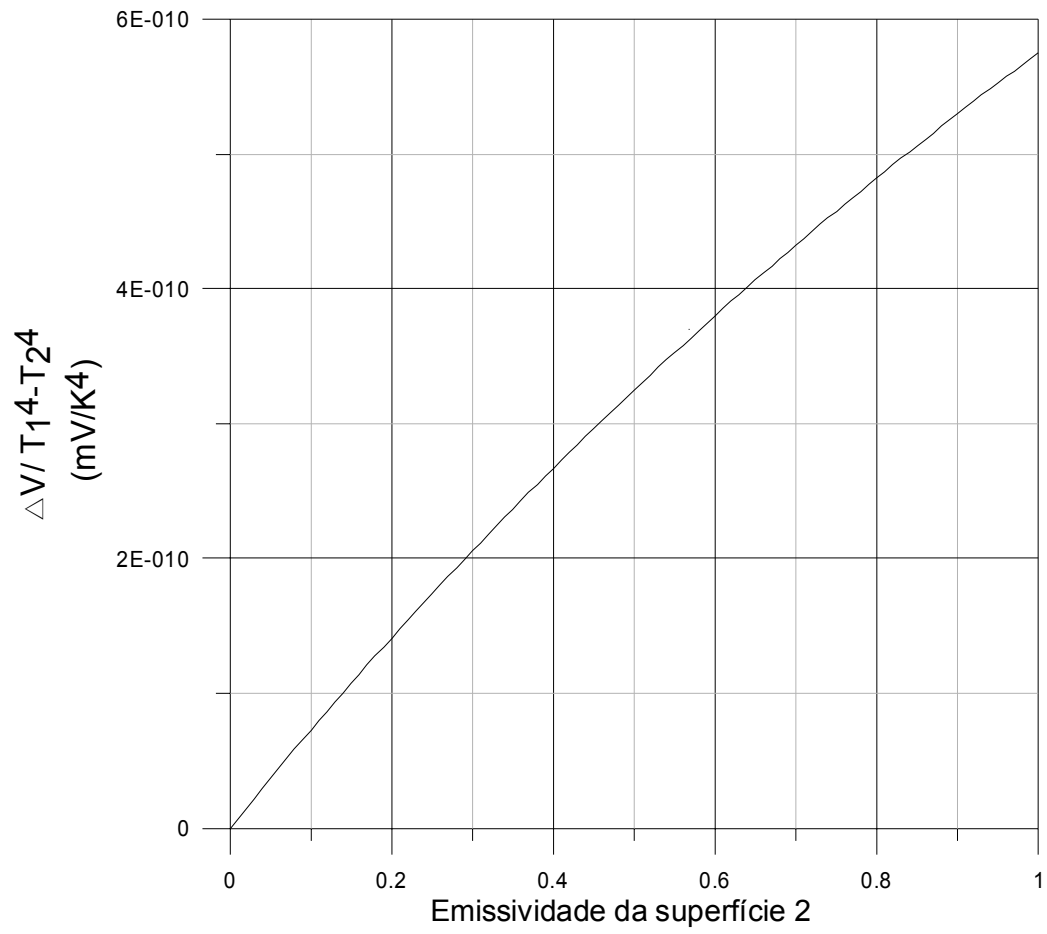


Figura 6.19. Gráfico da equação geral do medidor de emissividade pelo método radiométrico

## 7. TRABALHO EXPERIMENTAL

Pode-se dividir o trabalho de medições experimentais em 5 etapas principais:

- Seleção e preparação das amostras de interesse;
- Medições para calibração do dispositivo;
- Medições de amostras de emissividade desconhecida;
- Apresentação de resultados e análise de incertezas;
- Conclusões.

### 7.1. Seleção e preparação das amostras

Para avaliar o comportamento térmico do calorímetro, selecionaram-se amostras com valores de emissividade variados, altos ( $\varepsilon \sim 0,9$ ), médios ( $\varepsilon \sim 0,5$ ), baixos ( $\varepsilon \sim 0,1$ ).

Estas amostras são apresentadas na Tabela 7.1, com valores de propriedades termofísicas encontradas na literatura. Para condutividade térmica é apresentado um valor único, considerado válido durante as medições, independente da temperatura. Para emissividade é apresentada com uma faixa de valores, que servem apenas para comparativo com medidas de emissividade efetuadas.

Todas as amostras foram preparadas sempre sobre uma placa de vidro espessura 6 mm, largura 200 x comprimento 200 mm. Esta placa de vidro fazia parte do calorímetro. Os filmes de amostras de diferentes materiais eram colocados sobre a placa de vidro, e o contato térmico entre elas era melhorado com um fino filme de água.

### 7.2. Medições para calibração do dispositivo

#### 7.2.1. Amostras de referência utilizadas na calibração

Uma das maiores dificuldades no desenvolvimento deste trabalho foi de encontrar amostras com valores conhecidos das suas propriedades termofísicas (emissividade hemisférica, condutividade térmica), que pudessem ser utilizadas como padrões de referência para calibração.

Tabela 7.1. Propriedades termofísicas das amostras avaliadas

Amostra	Material		Valores considerados válidos neste trabalho		
			Valores encontrados na literatura		Espessura [mm]
			Emissividade hemisférica (a ~300 K)	Condutividade térmica [W/m.K]	
Am 1	Tinta preta		0,87 a 0,95	~0,2	~0,02
Am 2	Tinta alumínio		0,27 a 0,67	~0,2	~0,02
Am 3	Vidro comum		0,84 a 0,92	~0,917	~6,00
Am 4	Vidro com uma face <i>low-e</i> (baixa emissividade)	Lado 1: vidro comum	0,84 a 0,92	~0,917	~6,00
		Lado 2: <i>low-e</i>	~0,10 (*)	~0,917	
Am 5	Filme de controle solar usual sobre vidro		0,77 (*)	~0,2	~0,08
Am 6	Filme de controle solar de baixa emissividade ( <i>low-e</i> ) sobre vidro		0,33 (*)	~0,2	~0,08
Am 7	Cobre comercial polido manualmente		0,03 a 0,07	~370	~0,30
Am 8	Papel alumínio oxidado		0,10 a 0,22	~204	~0,01
Am 9	Papel alumínio		0,03 a 0,07	~204	~0,01
Am 10	Papel alumínio com vapor de água condensado		---	~204	~0,01
Am 11	Vidro com vapor de água condensado		---	~0,917	~6,00

(\*) Dados retirados de catálogos de fabricantes

A amostra Am4 (vidro *low-e*) possui duas faces: uma face é vidro comum, e a outra face possui baixa emissividade devido a deposição de finíssima camada metálica. Dois tipos de filmes (películas plásticas) que usualmente são aplicados sobre vidro para proteção solar foram avaliados, sendo que a amostra Am5 é um filme comum ( $\epsilon \sim 0,77$ ) e a amostra Am6 é um filme especial considerado de baixa emissividade ( $\epsilon \sim 0,33$ ).

Para observar o comportamento do equipamento desenvolvido, buscou-se materiais de referência com algumas características de interesse: estes deveriam ser no mínimo dois materiais, um com baixa emissividade e outro com alta emissividade, para avaliação nos dois extremos da faixa de medição (emissividade de 0 a 1); deveriam ter alta estabilidade e alta resistência a oxidação; deveriam possuir propriedades termofísicas bem conhecidas; deveriam ser preferencialmente de fácil obtenção e possuir baixo custo.

Estas características levaram a selecionar como padrões o vidro comum e alumínio. A Tabela 7.2 apresenta as amostras e os respectivos valores de referência utilizados neste processo de calibração, os quais são apresentados na literatura técnica e mostraram-se compatíveis com medidas efetuadas com medidor portátil disponível no Laboratório de Energia Solar (medidor comercial portátil, modelo AE, apresentado na Figura 5.7). O anexo A1 apresenta informações adicionais sobre valores de emissividade do vidro e do alumínio. Na Figura A1.2 pode-se observar que o vidro pode ser considerado opaco a radiação térmica na faixa espectral de 5 a 100  $\mu\text{m}$ .

Para calibração do calorímetro a partir do modelo matemático desenvolvido era necessária apenas uma amostra (o vidro), porém a segunda amostra (o alumínio) auxiliou também na determinação do valor da emissividade do bloco quente emissor (superfície 1: tinta preta sobre alumínio). O valor de emissividade  $\epsilon_1 = 0,88$ , foi o que melhor se ajustou aos experimentos. Este valor foi posteriormente confirmado por medição efetuada com o referido medidor portátil modelo AE.

Tabela 7.2. Valores das propriedades termofísicas das amostras utilizadas como referência no processo de calibração

<b>Tag</b>	<b>Material</b>	<b>Emissividade hemisférica (a ~300 K)</b>	<b>Condutividade térmica [W/m.K]</b>
Am 3	Vidro comum	0,84	0,917
Am 9	Papel alumínio, liso	0,05	204

### 7.2.2. Roteiro de calibração do dispositivo no método calorimétrico

A partir das equações do modelo matemático teórico, iniciam-se as medições experimentais de calibração do equipamento, para determinação da constante geral do calorímetro “UAG<sub>12</sub>”, conforme segue:

- Parti-se de parâmetros dimensionais conhecidos (Tabela 6.3) como áreas das superfícies A<sub>1</sub> e A<sub>2</sub>, distancia entre superfícies L<sub>12</sub>; fatores de forma F<sub>12</sub>, F<sub>1R</sub>, F<sub>2R</sub>;
- Considera-se conhecidas também às propriedades dos materiais do calorímetro (Tabela 6.3) e das amostras de referência (Tabela 7.2): k<sub>12</sub>, condutividade térmica do ar, e ε<sub>1</sub>, emissividade da superfície 1, ε<sub>2</sub>, emissividade da superfície 2 (padrão) ;
- Força-se as temperaturas em valores constantes T<sub>7</sub> ~55°C (através do aquecedor elétrico do bloco emissor), T<sub>6</sub> ~22°C (temperatura ambiente, através do através do resfriador termoelétrico);
- Uma vez atingido o regime quase permanente (após aproximadamente 8 horas), medem-se as temperaturas T<sub>7</sub>, T<sub>6</sub>, as tensões “V<sub>aq</sub>” e a corrente “I<sub>aq</sub>” entregues ao calorímetro;
- Calcula-se demais temperaturas, através das equações do modelo matemático do calorímetro;
- Por fim, calcula-se a constante de calibração geral do calorímetro “UAG<sub>12</sub>”, para ser utilizada posteriormente em medições de amostras de emissividade desconhecida.

Utilizaram-se duas amostras, apresentadas na Tabela 7.2, para calibração e determinação experimental da constante do calorímetro ("UAG<sub>12</sub>" constante de calibração geral).

O valor do parâmetro constante resultante que melhor se ajustou aos experimentos de calibração das duas amostras foi  $UAG_{12} = 0,0783 \pm 0,0069$  W/K.

### 7.2.3. Roteiro de calibração do dispositivo no método radiométrico

A partir das equações do modelo matemático, iniciam-se as medições experimentais de calibração do radiômetro, para determinação da constante de proporcionalidade radiométrica "CPR", conforme segue:

- Parti-se de parâmetros dimensionais conhecidos (Tabela 6.3) como áreas das superfícies A<sub>1</sub> e A<sub>2</sub>, distancia entre superfícies L<sub>12</sub>; fatores de forma F<sub>12</sub>, F<sub>1R</sub>, F<sub>2R</sub>;

- Considera-se conhecidos também as propriedades dos materiais do calorímetro (Tabela 6.3) e das amostras de referência (Tabela 7.2):  $k_{12}$ , condutividade térmica do ar, e  $\epsilon_1$ , emissividade da superfície 1,  $\epsilon_2$ , emissividade da superfície 2 (padrão) ;
- Forçam-se as temperaturas em valores constantes  $T_7 \sim 55^\circ\text{C}$  (através do aquecedor elétrico do bloco emissor),  $T_6 \sim 22^\circ\text{C}$  (temperatura ambiente, através do através do resfriador termoelétrico);
- Uma vez atingido o regime quase permanente (após aproximadamente 8 horas), medem-se as temperaturas  $T_7$ ,  $T_6$ , a tensão diferencial dos sensores de radiação  $\Delta V$ ;
- Calculam-se demais temperaturas, através das equações do modelo matemático do radiômetro;
- Por fim calcula-se a constante de proporcionalidade "CPR", para serem utilizadas posteriormente em medições de amostras de emissividade desconhecida;

Utilizaram-se duas amostras, apresentadas na Tabela 7.2, para calibração e determinação experimental da constante de proporcionalidade do radiômetro CPR, sendo que o valor que melhor se ajustou aos experimentos de calibração, para as duas amostras, foi  $\text{CPR} = 0,977 \pm 0,049$  W/mV.

### 7.3. Medições efetuadas

Quanto à operação, o experimento se desenvolve em duas fases: pré-aquecimento do calorímetro (regime transiente), e a medição propriamente dita após ser atingido o equilíbrio térmico (regime permanente).

Durante o pré-aquecimento (regime transiente) o controle de temperatura fez-se por controladores microprocessados, para um pré-aquecimento mais rápido, sem que as temperaturas passassem dos pontos esperados.

Uma vez atingido os pontos de temperatura adequados as medições de interesse, desligavam-se os controladores e as tensões de alimentação das fontes eram fixados nos valores médios indicados pelos controladores no momento em que eram desligados. Os controladores eram desligados para evitar oscilações nas medidas, já que estes ficavam “modulando” em torno das temperaturas de equilíbrio ajustadas.

Esta operação, com valores fixos, era mantida até o momento que foi observado no sistema de aquisição de dados que não havia mais mudança significativa nos valores de



temperaturas medidas. Algumas vezes era necessário reajustar manualmente alguns parâmetros, e aguardar até que fosse atingido o regime quase permanente nos valores de temperatura esperados.

As medições eram feitas simultaneamente pelo método calorimétrico e pelo método radiométrico, porém de maneira independentes.

No método radiométrico as medidas eram efetuadas durante todo o tempo de pré-aquecimento (no regime transiente até atingir o regime quase permanente), enquanto que no método calorimétrico somente eram consideradas válidas as medidas efetuadas após atingir o regime quase permanente.

As medições pelo método calorimétrico são bastante demoradas, tomando o tempo de aproximadamente 8 horas para obtenção de uma medida de emissividade. Este tempo se faz necessário para garantir que o sistema atingiu o regime quase permanente.

Com o método radiométrico proposto parece ser possível efetuar as medições de emissividade em menor tempo (cerca de 1 hora), pois foram observadas pequenas mudanças no valor da emissividade medida a partir de 1 hora, mesmo que o dispositivo ainda não tivesse atingido o regime quase permanente.

Com o objetivo de observar a validade da consideração inicial de que os sensores de radiação utilizados produzem um sinal de saída de tensão linear com o fluxo de radiação (conforme representado pelas equações 6.13 e 6.17), durante as medições com as duas amostras de referência, foram registrados vários pontos de medidas, enquanto o sistema era aquecido e depois resfriado (durante o regime transiente de aquecimento e resfriamento).

Para isto, na etapa de aquecimento, faz-se subir lentamente a temperatura do bloco quente emissor  $T_1$  da temperatura ambiente  $\sim 22^\circ\text{C}$  até  $55^\circ\text{C}$ , mantendo fixa a temperatura  $T_2$  em  $22^\circ\text{C}$  (amostra), calculando  $(T_1^4 - T_2^4)$ , versus a tensão diferencial " $\Delta V$ " medida nos sensores térmicos de radiação. Repete-se o procedimento, agora deixando o bloco emissor em resfriamento lento, da temperatura  $T_1 \sim 55^\circ\text{C}$  até a temperatura ambiente  $\sim 22^\circ\text{C}$ .

O resultado destas medições pode ser visto na Figura 7.1.a, que apresenta um gráfico  $\Delta V \times (T_1^4 - T_2^4)$ , para a amostra Am 3 (vidro liso) e Am 8 (papel alumínio). Neste gráfico observa-se uma pequena diferença para medidas efetuadas entre as etapas de aquecimento e resfriamento, formando um laço de histerese, em torno de uma reta ideal que passa pela origem. A Figura 7.1.b apresenta estas mesmas medidas em escala ampliada, para a amostra Am 8 (papel alumínio).

Com os resultados das medições experimentais, representadas na Figura 7.1, é possível considerar que o lado direito da equação 6.17 " $\Delta V / (T_1^4 - T_2^4)$ ", é constante para cada valor de

emissividade da amostra “ $\varepsilon_2$ ”. Sendo assim, a eq. 6.17 pode ser calibrada para amostras com diferentes valores de emissividade conhecida “ $\varepsilon_2$ ”, gerando uma família de retas, com inclinações diferentes, onde a inclinação das retas é função da emissividade da amostra “ $\varepsilon_2$ ”.

Pode-se prever com a eq. 6.17 (ou com o gráfico da Figura 6.19) que a reta de pontos com inclinação máxima ocorre com a emissividade “ $\varepsilon_2 \cong 1$ ”, correspondente a  $\Delta V/(T_1^4 - T_2^4) \cong 5,752 \times 10^{-10}$ . No caso hipotético de amostra com emissividade nula “ $\varepsilon_2 = 0$ ”, a reta teórica representativa localiza-se horizontalmente sobre o eixo das abcissas. No caso de emissividades intermediárias “ $0 < \varepsilon_2 < 1$ ”, as retas localizam-se em inclinações intermediárias quase que linearmente proporcionais a tangente do ângulo da inclinação, conforme comportamento apresentado no gráfico da Figura 7.2.

Para medição de emissividade pelo método radiométrico pode-se utilizar o gráfico apresentado na Figura 6.19 ( $\Delta V/(T_1^4 - T_2^4) \times \varepsilon_2$ ) ou a equação 6.20 que é a equação particular deste radiômetro desenvolvido.

A Figura 7.2 apresenta outro tipo de gráfico teórico “ $\Delta V \times (T_1^4 - T_2^4)$ ”, que também pode ser usado para determinação gráfica da emissividade, similar à Figura 7.1.

Durante algumas medidas, principalmente com amostras de baixa emissividade, como o alumínio, observava-se ocorrência de condensação sobre a amostra, da umidade do ar existente dentro da cavidade. Este efeito era observado pelo desvio no gráfico “ $\Delta V \times (T_1^4 - T_2^4)$ ” (Figura 7.3). O filme de vapor de água condensado formava-se lentamente até estabilizar a medida em valor de emissividade medida de aproximadamente  $\sim 0,6$ . Sabe-se que a água possui alto valor de emissividade (cerca de  $\sim 0,92$ ), sendo o valor de emissividade de  $\sim 0,6$  razoável para filme de vapor de água sobre alumínio.

A Figura 7.3 apresenta a ocorrência deste efeito de condensação, desviando os pontos do caminho esperado para amostra de alumínio durante etapa de aquecimento. No gráfico aparecem dois desvios. O primeiro desvio mostra que a condensação foi se formando e o valor da emissividade medida foi aumentando. No momento em que o valor  $(T_1^4 - T_2^4) \approx 3,3 \times 10^9$ , o equipamento foi aberto, confirmando visualmente a existência de filme de água condensada sobre a amostra. Neste momento a amostra é seca e o equipamento é fechado novamente seguindo com medições. Observa-se que o primeiro ponto com a amostra seca ocorre sobre a trajetória prevista para ao alumínio, porém inicia rapidamente o processo de condensação desviando novamente a curva para o local no gráfico de altos valores de emissividade. Neste momento, o processo é interrompido. O equipamento é novamente aberto, constatado o filme de condensação sobre a amostra, a amostra é seca novamente, o equipamento é novamente fechado.

Desligam-se as fontes de aquecimento do bloco quente, e inicia-se o processo de medidas da amostra alumínio em resfriamento lento.

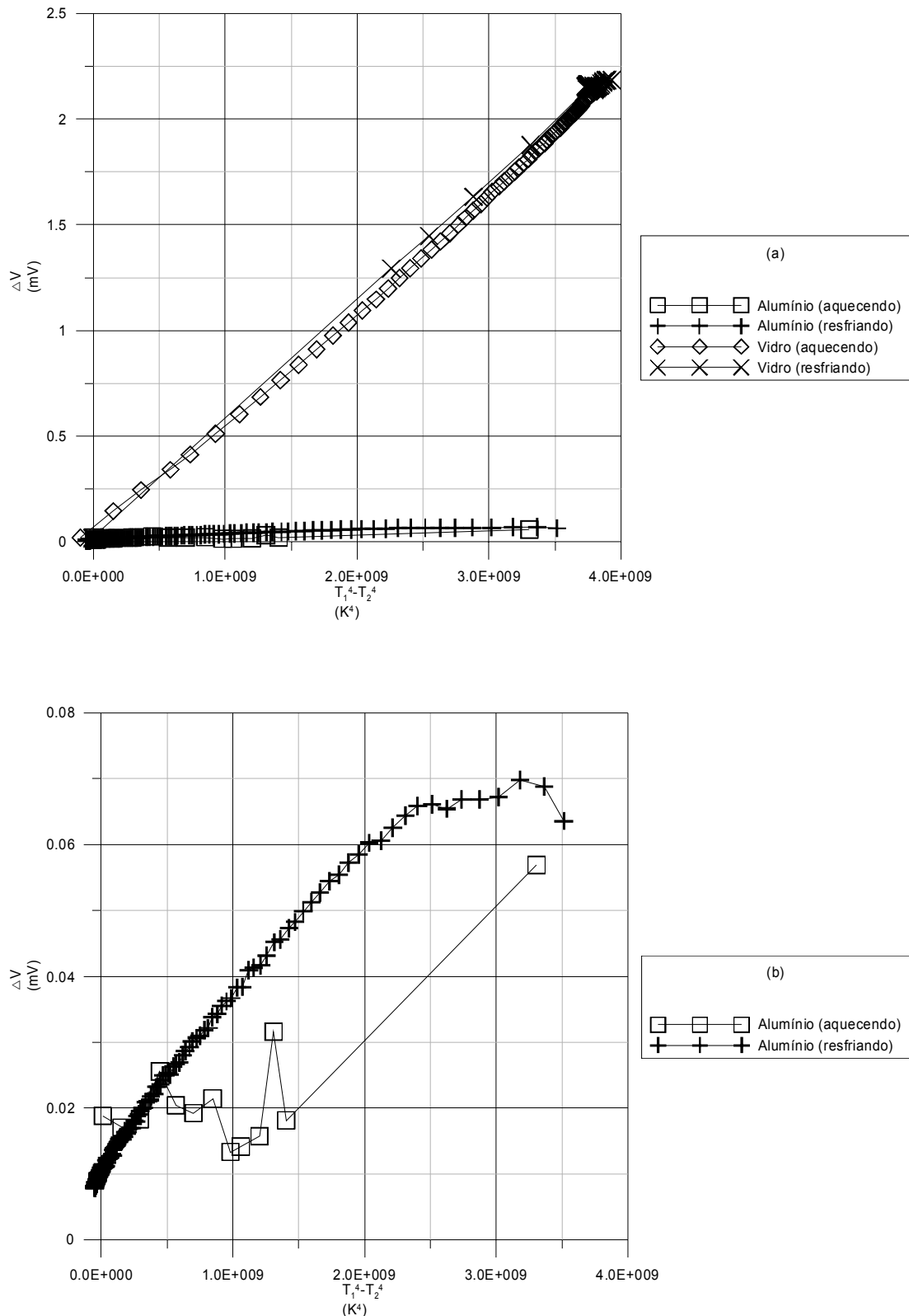


Figura 7.1. Gráfico " $\Delta V \times (T_1^4 - T_2^4)$ " com resultados experimentais para amostras de referência: (a) vidro comum  $\epsilon_2 \sim 0,84$  e alumínio  $\epsilon_2 \sim 0,05$ ; (b) vista ampliada somente para amostra alumínio  $\epsilon_2 \sim 0,05$

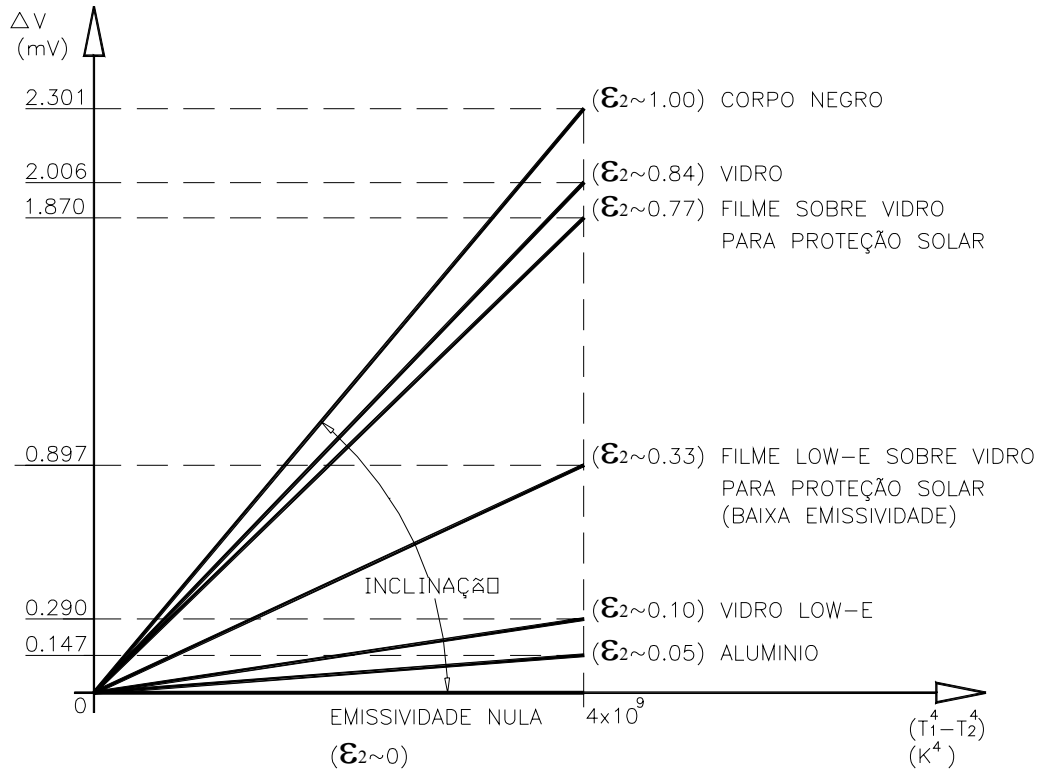


Figura 7.2. Gráfico teórico " $\Delta V \times (T_1^4 - T_2^4)$ ", para previsão de emissividade de amostras diversas

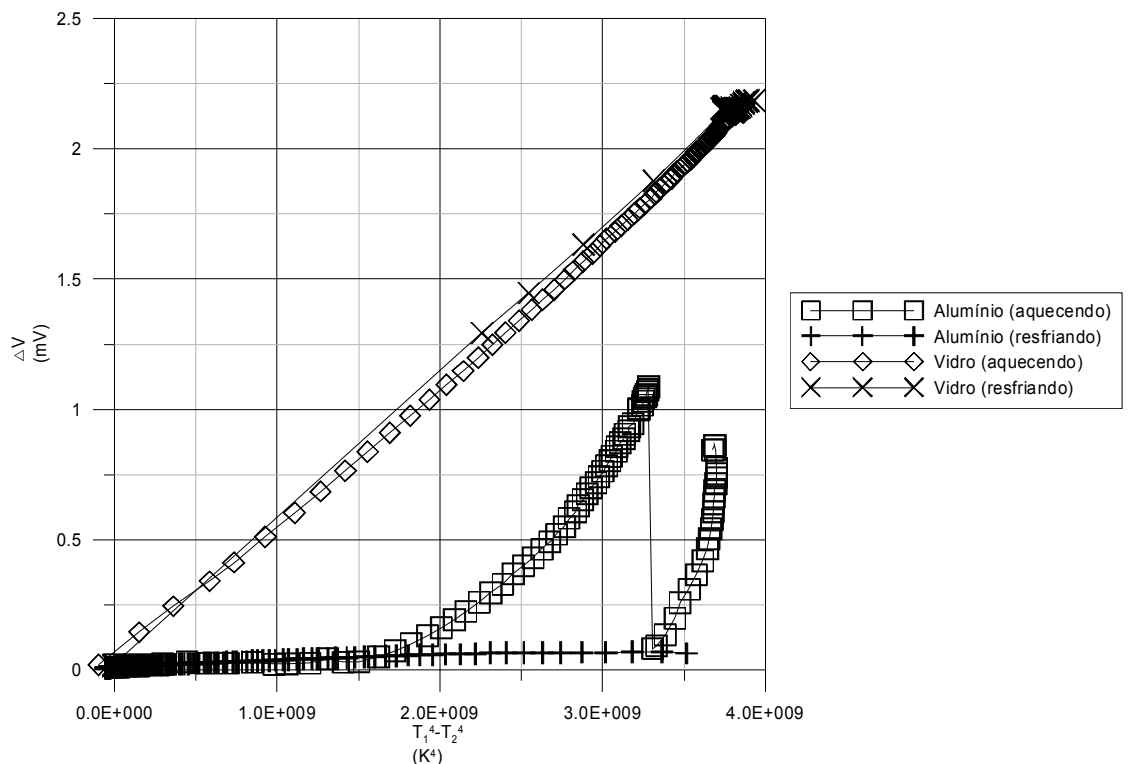


Figura 7.3. Gráfico " $\Delta V \times (T_1^4 - T_2^4)$ " com resultados experimentais para amostras de referência: (a) vidro comum  $\epsilon_2 \sim 0,84$ , alumínio  $\epsilon_2 \sim 0,05$ , alumínio condensando umidade do ar na etapa de aquecimento, atingindo  $\epsilon_2$  ALUMÍNIO CONDENSADO  $\sim 0,6$

#### 7.4. Análise de incerteza experimental

Experimentos geralmente consistem numa seqüência de operações e passos. Cada passo experimental atua como potencial fonte de incertezas, com efeito, que deve ser avaliado. De maneira geral, pode-se citar algumas fontes de incertezas:

- Imprecisão do modelo matemático que descreve o fenômeno físico;
- Inerente variabilidade estocástica dos processos de medição;
- Incertezas dos padrões de referência e instrumentação de calibração;
- Instabilidade dependente do tempo causado por mudanças graduais nos padrões e instrumentação;
- Condições ambientais variáveis (temperatura e umidade) durante os experimentos;
- Valores de constantes e outros parâmetros obtidos de fontes externas;
- Erros e variabilidade de dimensões físicas;
- Incertezas decorrentes de interferências, impurezas, não-homogeneidade, resolução inadequada, e descrição incompleta;
- Incertezas computacionais e análise de dados;
- Especificações e procedimentos errados;
- Práticas do laboratório, incluindo técnicas manuais, limpeza, enganos grosseiros do experimentalista, etc.

Erros estão sempre presentes quando medições experimentais são feitas. Os erros podem ser de dois tipos. O erro fixo (ou sistemático) causa repetidas medições erradas da mesma quantidade em cada tentativa. O erro fixo é o mesmo para cada leitura, e pode ser eliminado por calibração ou correção apropriada. O erro aleatório (não repetitivo) é diferente para cada leitura e, por isso, não pode ser eliminado. Os fatores que introduzem o erro aleatório são incertos por sua própria natureza. O objetivo da análise de incertezas é estimar o erro aleatório provável nos resultados experimentais.

Admite-se que o equipamento foi construído corretamente e calibrado de forma apropriada para minimizar erros fixos. Admite-se que os instrumentos têm resolução apropriada e que as flutuações nas leituras não são excessivas. Admite-se, também, que observações são feitas e registradas com o devido cuidado de modo que só os erros aleatórios permaneçam.

#### 7.4.1. Método utilizado para análise de incertezas

Para análise de incertezas dos resultados experimentais utilizou-se o método proposto por Kline e McClintock (1953), descrito em Holman (2001). Este método é baseado na cuidadosa especificação das incertezas das várias medidas experimentais primárias. Supondo que uma variável medida "R" é função de diversas variáveis primárias independentes  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Então

$$R = R(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (7.1)$$

Sendo  $w_1, w_2, \dots, w_n$ , as incertezas individuais das respectivas variáveis primárias independentes  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , o referido método propõe que a incerteza da resultante final medida " $w_R$ ", seja calculado pela eq. 7.2.

$$w_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} \cdot w_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} \cdot w_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} \cdot w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7.2)$$

Para minimizar o esforço matemático para as análises de incertezas dos diversos resultados experimentais deste trabalho, utilizou-se o programa de computador para engenharia "EES - Engineering Equation Solver", ferramenta "Uncertain Propagation", que é baseado no método proposto por Kline e McClintock. O referido programa calcula numericamente a incerteza da medição resultante, a partir dos dados de entrada, que são: Equação matemática que representa fisicamente a variável de interesse medida, os valores das variáveis primárias independentes medidas e os respectivos valores das incertezas individuais estimadas.

#### 7.4.2. Estimativas das incertezas experimentais

Como todo instrumento, o calorímetro construído está sujeito a erros porque os componentes que o constituem não são ideais e porque os conceitos de sua hipótese de funcionamento não se cumprem de forma ideal. Está também sujeito a limitações de precisão e exatidão nas medidas de temperatura, tensão, corrente, e dimensões. A combinação dos erros que não podem ser estimados para introduzir sua correção leva à incerteza na determinação da

emissividade, a qual não é constante, pois depende da própria emissividade da amostra e das condições térmicas em que o ensaio foi realizado.

A seguir são analisados alguns fatores que causam erros no resultado e é apresentada uma estimativa da incerteza que os mesmos acarretam na medida da emissividade.

Erros da instrumentação: A Tabela 6.2 apresenta valores típicos de erros esperados para medidas de temperatura com termopares tipo J, porém neste trabalho foram utilizados valores apresentados pelo fabricante do instrumento. A Tabela 7.3 apresenta os erros estimados para medidas de tensão e temperatura, conforme apresentado na documentação técnica do fabricante do sistema de aquisição de dados (Agilent, 1999). As informações apresentadas na Tabela 7.3 são utilizadas para estimativa das incertezas das medidas das variáveis primárias realizadas.

Tabela 7.3. Especificações de exatidão esperada para medidas efetuadas com o sistema de aquisição de dados Agilent 34970A, na temperatura ambiente de  $23 \pm 5$  °C.

Função	Faixa	Erros estimados	
Medição de temperatura com termopar tipo "J"	-150 a 1200°C	$\pm 1,0$ °C	
Medição de tensão elétrica		$\pm$ (% da medida + % do fundo de escala)	
		% da medida	% do fundo de escala
	0 a 100 mVCC	0,004	0,004
	0 a 10 VCC	0,002	0,0005
	0 a 100 VCC	0,0035	0,0006

Fluxo de calor não é unidimensional: O fluxo de calor deveria ocorrer apenas da placa quente para a amostra, na direção normal à superfície das duas. Se houver gradientes de temperatura no entorno da placa quente, isto é, se a blindagem térmica não estiver exatamente na mesma temperatura que a placa quente, parte da potência elétrica será dissipada em outras direções. O controle de temperatura assegura que a blindagem tenha menos de 1°C de diferença da placa quente e o isolamento de poliuretano entre dois elementos permite estimar que o fluxo de calor para cima e para os lados não é maior que 40 mW.

Precisão na temperatura da placa quente: A temperatura da placa quente é medida através de um termopar tipo J inserido dentro do disco de alumínio para que sua junção estivesse

próxima à superfície. A exatidão das temperaturas nestes ensaios é menos importante que sua precisão, isto é, se todos os sensores de temperatura indicam sempre um valor de temperatura com um erro sistemático de 1°C este erro pouco se reflete ao resultado, mas a diferença entre os sensores ou a falta de repetibilidade nas medidas pode ser bastante prejudicial. A medição de temperatura com o termopar é realizada com compensação interna no instrumento de leitura e tem uma incerteza de  $\pm 1,0$  °C.

Precisão na temperatura da mesa refrigerada: Como no caso da temperatura da placa quente, a mesa refrigerada tem um termopar inserido dentro da placa superior e com cerca de dez centímetros de comprimento também embutidos na placa, para diminuir erros por condução de calor nos fios do mesmo. O termopar utilizado é medido com compensação interna do instrumento de leitura e tem uma incerteza de  $\pm 1,0$  °C.

Precisão na temperatura da amostra: Infelizmente não é possível preparar todos os tipos de amostras com um termopar embutido e não é verdadeiro presumir que a amostra tenha a mesma temperatura da mesa, a menos que seja uma fina camada aderida à própria mesa. Para determinar a temperatura da amostra, é realizado um estudo em cada situação. Sabe-se que o valor será próximo ao da temperatura da mesa. Sabendo-se a temperatura em uma das faces da amostra e sua condutividade térmica é fácil avaliar a temperatura da face exposta, já que o fluxo de calor é unidirecional e medido. Para algumas amostras será necessário repetir a experiência várias vezes com termopares na superfície exposta para avaliar a relação entre a temperatura da mesa refrigerada com a da superfície, ou ainda estudar a amostra com termômetro sem contato, erguendo o cilindro aquecido por alguns segundos, sendo neste caso, necessário fazer uma iteração com os valores presumidos da emissividade. Na suposição de que estas preliminares tenham sido realizadas, não há motivos para estimar mais erro na temperatura da amostra do que os da temperatura da mesa refrigerada, considerando então também uma incerteza de  $\pm 1,0$  °C.

Precisão na determinação da potência de aquecimento: Os instrumentos utilizados na medição da corrente e da tensão são de alta precisão e a fonte de tensão utilizada garante a constância da potência aplicada. A inexatidão instrumental é  $\sim 0,0075\%$  na tensão e  $\sim 0,044\%$  da leitura na corrente, predominando esta última, evidentemente. O valor da potência varia para cada experimento, porém é estabelecido em torno de 4W, sendo a incerteza, neste caso, de 2 mW. A carga indutiva é desprezada, pois a alimentação elétrica é feita em corrente contínua.

Propriedades termofísicas, como condutividade térmica, e espessuras de amostras são consideradas constantes independentes das condições do experimento. Neste trabalho os respectivos valores de incertezas foram desconsiderados.



#### 7.4.2.1. Valores das incertezas no método calorimétrico

Para o método calorimétrico de medição de emissividade desenvolvido tem-se como variáveis primárias independentes as temperaturas  $T_1$  e  $T_6$ , a tensão elétrica do aquecedor  $V_{AQ}$ , a tensão elétrica  $V_{SHAQ}$  sobre o resistor *shunt* medidor da respectiva corrente elétrica  $I_{AQ}$ , (onde  $P_{AQ} = V_{AQ} \times I_{AQ}$ ), e as dimensões físicas da cavidade radiante raio  $r_1 = r_2$ , distancia  $L_{12}$ .

Consideram-se válidos os seguintes valores médios para as incertezas individuais das variáveis primárias: para temperatura  $w_{T1} = \pm 1,0^\circ\text{C}$ ,  $w_{T2} = \pm 1,0^\circ\text{C}$ ; para tensão elétrica  $w_{VAQ} = \pm 0,0011 \text{ V}$ ,  $w_{VHSA} = \pm 0,0044 \text{ mV}$ ; para dimensões  $w_{r1} = w_{r2} = \pm 0,0005 \text{ m}$ ,  $w_{L12} = \pm 0,0005 \text{ m}$ . Resultando ainda para a potência de aquecimento a incerteza  $w_{PAQ} = \pm 0,0022 \text{ W}$ .

Para análise de incertezas nos valores medidos de emissividade da amostra, utiliza-se a equação geral do dispositivo para o método calorimétrico (equações 6.9, 6.10, 6.11), com dados medidos processados no programa EES, resultando nos valores para incerteza da emissividade da amostra " $w_{\epsilon 2}$ ". Os valores medidos para emissividade e seus respectivos valores de incertezas podem ser vistos na Tabela 7.4.

#### 7.4.2.2. Valores das incertezas no método radiométrico

Para o método radiométrico de medição de emissividade desenvolvido tem-se como variáveis primárias independentes as temperaturas  $T_1$  e  $T_6$ , as tensões dos sensores detectores térmicos de radiação  $V_{SA}$ ,  $V_{SP}$ , e as dimensões físicas da cavidade radiante raio  $r_1 = r_2$ , distancia  $L_{12}$ .

Consideram-se válidos os seguintes valores médios para as incertezas individuais das variáveis primárias: para temperatura  $w_{T1} = \pm 1,0^\circ\text{C}$ ,  $w_{T2} = \pm 1,0^\circ\text{C}$ ; para tensão elétrica  $w_{VSA} = w_{VSP} = \pm 0,0043 \text{ mV}$ ; para dimensões  $w_{r1} = w_{r2} = \pm 0,0005 \text{ m}$ ,  $w_{L12} = \pm 0,0005 \text{ m}$ . Resultando para a diferença de tensão entre os sensores de radiação a incerteza  $w_{\Delta V_{SASP}} = \pm 0,0062 \text{ mV}$ .

Para análise de incertezas nos valores medidos de emissividade da amostra, utiliza-se a equação geral do dispositivo para o método radiométrico (equações 6.11, 6.17, 6.19), com dados medidos processados no programa EES, resultando nos valores para incerteza da emissividade da amostra  $w_{\epsilon 2}$ . Os valores da emissividade medidos e respectivos valores de incertezas podem ser vistos na Tabela 7.4.

## 7.5. Resultados obtidos

O instrumento construído é capaz de determinar o valor da emissividade hemisférica total de diversas superfícies para temperaturas próximas da temperatura ambiente. Somente porque a instrumentação é de muito boa qualidade é possível fazer medições deste tipo com resultados de confiabilidade. Foram medidos alguns materiais cujos valores esperados de emissividade se encontram em tabelas em publicações de uso na engenharia.

A Tabela 7.4 apresenta um resumo dos resultados obtidos para as medições de emissividade efetuadas com o equipamento desenvolvido, tanto pelo método calorimétrico como para o método radiométrico. São apresentadas também medidas de emissividade efetuadas, nestas mesmas amostras, com o medidor de emissividade portátil comercial disponível no Laboratório (Emissometer AE), apresentado na Figura 5.7.

Diversos ensaios foram feitos para cada amostra, e pode-se notar que os resultados das medidas não se repetem apesar de estarem dentro das incertezas previstas. Possivelmente repetindo as experiências várias vezes, fazendo uso de tratamentos estatísticos, assim como controlando melhor a condição em que o experimento é realizado, será possível obter melhores resultados.

A incerteza das medidas é dependente das incertezas das várias medidas primárias (parâmetros dimensionais do dispositivo, medidas de temperatura, medidas de tensão), porém observa-se que as incertezas das medidas de temperatura são as que mais contribuem para grande incerteza das medidas de emissividade, principalmente no método calorimétrico. Para minimizar incertezas nas medidas de emissividade poderiam-se utilizar sensores de temperatura de menor incerteza, como por exemplo sensores resistivos tipo Pt100 (a documentação técnica do fabricante do sistema de aquisição de dados Agilent 34970A indica incertezas de  $\pm 0,06$  °C para medição de temperatura com Pt100).

A Tabela 7.5. apresenta, para dois tipos de amostras (uma com alta emissividade, outra com baixa emissividade), um quadro comparativo que permite visualizar o efeito esperado sobre os valores das incertezas nas medidas da emissividade, caso tivessem sido utilizados sensores tipo Pt100 para medidas de temperatura.

Inicialmente as medições foram feitas com valores fixos para condutividade do ar  $k_{12}$ , porém observou-se maior repetibilidade nos resultados quando foi implementada no modelo matemático a equação 6.11 que corrige o valor da condutividade térmica do ar em função da temperatura média do ar dentro da cavidade. O efeito da umidade do ar foi desprezado.

Tabela 7.4. Resumo geral comparativo das medições efetuadas

Amostra	Material da amostra		Valores Medidos para Emissividade Hemisférica		
			Medidas efetuadas com Emissometer modelo AE	Medidas efetuadas com equipamento desenvolvido	
				Pelo método calorimétrico	Pelo método radiométrico
Am 1	Tinta preta		$0,88 \pm 0,02$	$0,91 \pm 0,14$	$0,88 \pm 0,05$
Am 2	Tinta alumínio		$0,50 \pm 0,02$	$0,43 \pm 0,07$	$0,54 \pm 0,03$
Am 3	Vidro comum		$0,84 \pm 0,02$	$0,84 \pm 0,13$	$0,84 \pm 0,05$
Am 4	Vidro com uma face <i>low-e</i> (baixa emissividade)	Lado 1: vidro liso	$0,87 \pm 0,02$	$0,85 \pm 0,13$	$0,86 \pm 0,05$
		Lado 2: face <i>low-e</i>	$0,07 \pm 0,02$	$0,02 \pm 0,05$	$0,07 \pm 0,004$
Am 5	Filme de controle solar usual sobre vidro		$0,76 \pm 0,02$	$0,77 \pm 0,12$	$0,75 \pm 0,04$
Am 6	Filme de controle solar de baixa emissividade ( <i>low-e</i> ) sobre vidro		$0,78 \pm 0,02$	---	---
Am 7	Cobre comercial polido manualmente		$0,04 \pm 0,02$	$0,08 \pm 0,06$	$0,05 \pm 0,004$
Am 8	Papel alumínio oxidado		$0,12 \pm 0,02$	$0,14 \pm 0,06$	$0,16 \pm 0,02$
Am 9	Papel alumínio		$0,04 \pm 0,02$	$0,06 \pm 0,05$	$0,04 \pm 0,004$
Am 10	Papel alumínio com vapor de água condensado		---	$0,70 \pm 0,11$	$0,65 \pm 0,03$
Am 11	Vidro com vapor de água condensado		---	$0,90 \pm 0,14$	$0,89 \pm 0,05$

(---) Não foi possível realizar a medida

Foi possível observar que as medidas de emissividade são sensíveis a variações no valor da condutividade do ar no interior da cavidade, sendo que no método calorimétrico são mais sensíveis do que no método radiométrico. Na Tabela 7.6 pode-se observar ainda que as variações na condutividade do ar causam maiores variações nas medidas em amostras com baixos valores de emissividade.

Tabela 7.5. Quadro comparativo de incertezas esperadas para medidas de emissividade com diferentes tipos de sensores de temperatura.

Amostra	Método	Medida da emissividade $\pm$ incerteza	
Am3 Vidro	Calorimétrico	0,84 $\pm$ 0,13	0,84 $\pm$ 0,03
	Radiométrico	0,84 $\pm$ 0,05	0,84 $\pm$ 0,02
Am9 Alumínio	Calorimétrico	0,06 $\pm$ 0,05	0,06 $\pm$ 0,01
	Radiométrico	0,04 $\pm$ 0,004	0,04 $\pm$ 0,002
Tipo de sensor de temperatura		Termopar	Pt100
Incerteza considerada nas temperaturas $T_1, T_2$		$w_{T1} = w_{T2} = \pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$	$w_{T1} = w_{T2} = \pm 0,06 \text{ }^\circ\text{C}$

Tabela 7.6. Análise de sensibilidade do efeito da variação da condutividade térmica do ar nas medidas efetuadas em amostras de alta e baixa emissividade.

Variação na condutividade térmica do ar	Amostra Am3: Vidro				Amostra Am9: Alumínio			
	Calorimétrico		Radiométrico		Calorimétrico		Radiométrico	
	$\epsilon_2$	%	$\epsilon_2$	%	$\epsilon_2$	%	$\epsilon_2$	%
- 10 %	0,872	4 %	0,839	0 %	0,058	57 %	0,07	0 %
- 5 %	0,856	2 %	0,840	0 %	0,048	30 %	0,07	0 %
0 %	0,840	0 %	0,840	0 %	0,037	0 %	0,07	0 %
5 %	0,824	-2 %	0,841	0 %	0,027	-27 %	0,07	0 %
10 %	0,808	-4 %	0,841	0 %	0,016	-57 %	0,07	0 %

Usualmente as medições de propriedades radiantes dos materiais são feitas por dispositivos que utilizam procedimentos e características para eliminar o efeito de transferência de calor por condução e por convecção, por exemplo, utilizando vácuo e guarda térmica.

Este dispositivo utiliza apenas a guarda térmica. O grande desafio deste dispositivo era de efetuar medições de transferência de calor por radiação combinadas com transferência de calor por condução, pensando ser possível modelar matematicamente o dispositivo térmico de maneira simples, e através de calibração definir parâmetros de operação que permitissem eliminar matematicamente o efeito de transferência de calor por condução.

A Tabela 7.7 apresenta dados comparativos para duas amostras de diferentes valores emissividade medidos (uma com alta emissividade e outra com baixa emissividade).

Na Tabela 7.7 e na Figura 7.4 pode-se observar que para amostras de emissividade alta  $\sim 0,84$  a parcela de transferência de calor desviado "bypass indesejável" representa  $\sim 51\%$  da potência total injetada no calorímetro, e para amostras com baixos valores de emissividade  $\sim 0,04$  a parcela de transferência de calor desviado "bypass indesejável" representa  $\sim 80\%$  da potência total injetada no calorímetro.

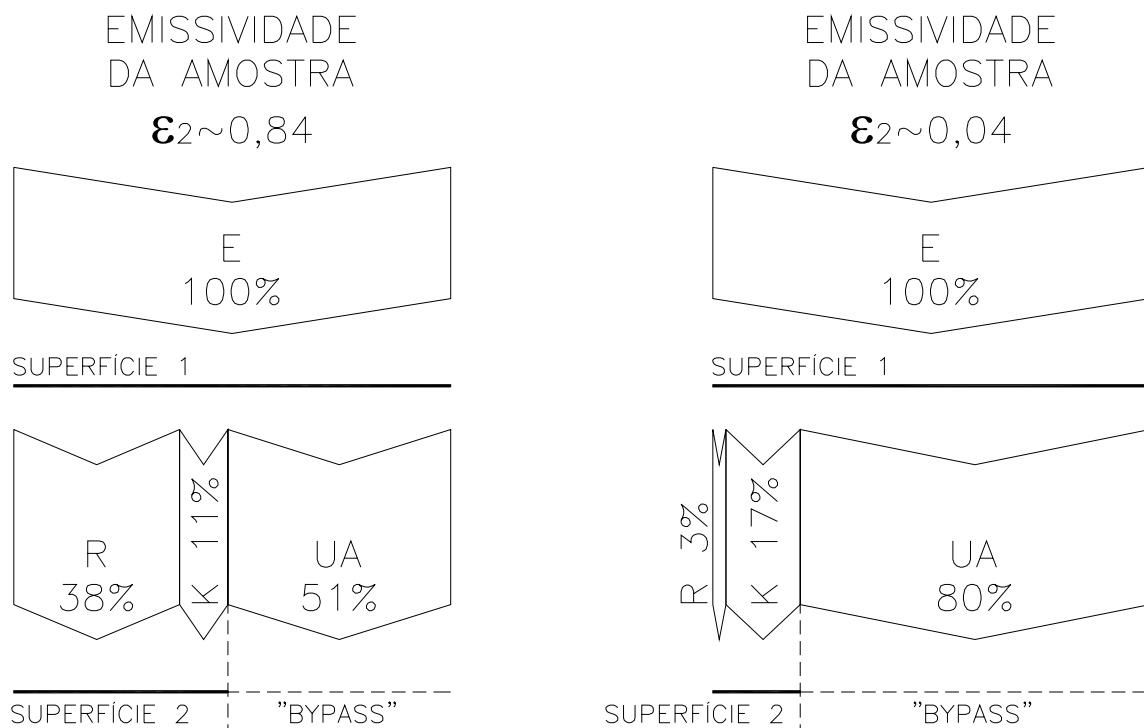


Figura 7.4. Parcelas de fluxo de calor no interior da cavidade, conforme exemplo Tabela 7.7: (E) Potência elétrica de aquecimento, (R) parcela de transferência de calor por radiação, (K) parcela de transferência de calor por condução através do ar, e (UA) a parcela de calor desviado, versus a emissividade da superfície 2 (amostra).

Nas medidas realizadas pelo método calorimétrico, pode-se observar o peso das parcelas de transferência de calor por condução, e por radiação, no interior da cavidade, e a parcela do desvio "bypass" (conforme Figuras 6.18, 6.19, 7.4), e o quanto estas parcelas são influenciadas pela emissividade da amostra. Observa-se também que a condutividade do ar não é constante, pois é função da temperatura  $T_1$  e  $T_2$  (equação 6.11).

Nas medidas realizadas pelo método radiométrico observa-se que para amostras avaliadas, os sensores radiométricos fornecem um sinal linear de tensão de  $\sim 0,013$  mV por  $W/m^2$  de fluxo radiante a que estão expostos (este valor de sensibilidade é cerca de 1/3 da sensibilidade do sensor radiométrico apresentado no item 5.1.2 desta dissertação) .

Tabela 7.7. Exemplo de resultados das medidas efetuadas em amostras de alta e baixa emissividade.

<b>DADOS DE ENTRADA COMUNS</b>	$T_1$	°C	54,6	58,1
Temperaturas	$T_6$	°C	21,4	21,5

<b>MÉTODO CALORIMÉTRICO</b>	<b>Emissividade da amostra</b>		<b>0,84</b>	<b>0,04</b>
Potência elétrica de aquecimento	<b>Paq</b>	<b>W</b>	4,935	3,561
Temperatura da amostra	$T_2$	°C	22,7	21,9
Parcela de transferência de calor por <b>RADIAÇÃO</b>	$Q_{r12}$	W	1,90	0,12
	$q_{r12}$	W/m <sup>2</sup>	147,6	9,3
	$Q_{r12}/Paq$	%	38%	3%
Parcela de transferência de calor por <b>CONDUÇÃO</b>	$Q_{c12}$	W	0,53	0,60
	$Q_{c12}/Paq$	%	11%	17%
	$K_{ar12}$	W/m.K	0,02717	0,02727
Parcela de transferência de calor desviada <b>BYPASS</b>	Qbypass	W	2,51	2,84
	$Q_{bypass}/Paq$	%	51%	80%
Constante do calorímetro	UAG12	W/K	0,07828	0,07828

<b>MÉTODO RADIOMÉTRICO</b>	<b>Emissividade da amostra</b>		<b>0,84</b>	<b>0,04</b>
Diferença de tensão nos sensores radiométricos	$\Delta V$	<b>mV</b>	1,95	0,12
Diferença das temperaturas na quarta potência	$T_1^4 - T_2^4$	<b>K<sup>4</sup></b>	3,88E+09	4,46E+09
Sensibilidade	$\Delta V/q_{r12}$	mV / (W/m <sup>2</sup> )	0,0132	0,0129
Constante de proporcionalidade radiométrica	CPR	W/mV	0,9771	0,9771

### 7.5.1. Método calorimétrico

As medições pelo método calorimétrico são bastante demoradas, levando o tempo de aproximadamente 8 horas para obtenção de uma medida de emissividade. Este tempo se faz necessário para garantir que o sistema atinja o regime permanente.

As medições efetuadas demonstram que o dispositivo calorimétrico desenvolvido mede melhor amostras de alta emissividade (acima de  $\sim 0,5$ ), pois no caso de amostras de baixa emissividade tem-se maior incerteza. Sendo assim, seguem algumas justificativas tentando explicar este comportamento observado.

Não se cumprem totalmente, considerações e simplificações prévias adotadas para desenvolvimento do modelo matemático: de que as propriedades radiantes (isto é refletividade, emissividade, absortividade) sejam uniformes independentes da direção (superfícies difusas) e independentes do comprimento de onda (superfícies cinzas); de que a temperatura é uniforme sobre toda superfície de cada zona (superfície isotérmica); de que a irradiação e radiosidade são uniformes sobre toda superfície de cada zona; de que o fluxo de calor combinado resultante que atravessa a cavidade é uniforme sobre toda superfície de cada zona; da existência de superfície reirradiante perfeita na lateral da cavidade. Estas considerações parecem não serem todas aceitáveis simultaneamente, principalmente quando se tem amostra de baixa emissividade como o alumínio, que tem grande variação da emissividade direcional.

O calorímetro tem dimensões reduzidas que aumenta o efeito indesejável resultante da transferência de calor pelas bordas, etc.

Este dispositivo não é um dispositivo absoluto e depende fortemente de calibração com padrões de referência, dos quais se deve ter conhecimento prévio das propriedades termofísicas das superfícies da cavidade e da amostra.

Houve grande dificuldade na caracterização das superfícies que compõem a cavidade radiante e na obtenção de amostras com propriedades termofísicas das superfícies totalmente conhecidas, emissividade total hemisférica, e ainda a condutividade térmica das amostras.

As Figuras 7.4 e 7.5. mostram que quando se tem amostra com baixa emissividade a parcela que representa a transferência de calor por radiação é pequena, e a parcela de transferência de calor por condução através do ar somada à parcela de condução desviada através da parede do equipamento são dominantes, e conseqüentemente muito variáveis já que a condutividade térmica do ar é muito sensível a variações de temperatura e umidade relativa.



A parcela de transferência de calor desviada através do corpo e do isolamento térmico do calorímetro também é variável com a temperatura (pois o isolamento baseia-se em um polímero com pequenas bolhas de ar).

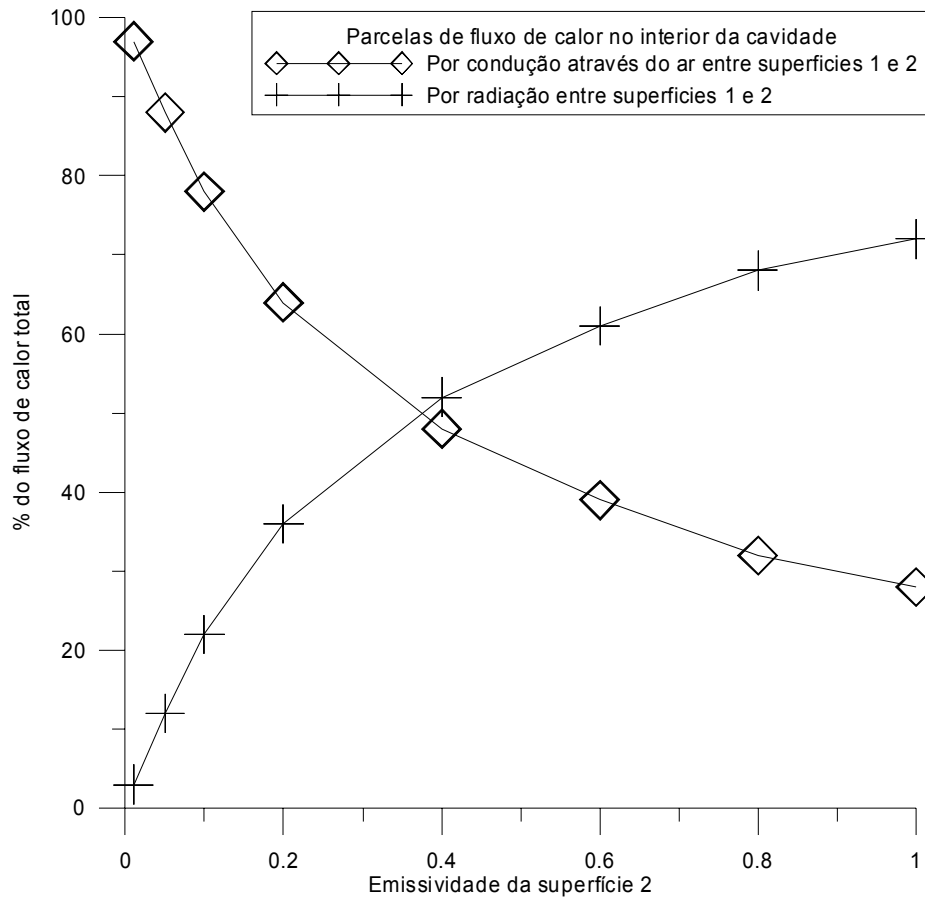


Figura 7.5. Parcelas de fluxo de calor no interior da cavidade: por condução através do ar e por radiação entre superfícies 1 e 2, versus a emissividade da superfície 2 (amostra).

### 7.5.2. Método radiométrico

As medições radiométricas óticas apresentadas na Figura 7.1, mostram um pequeno laço de histerese das medidas quando em regime transiente em resfriamento, e em aquecimento.

Com o método radiométrico proposto parece ser possível efetuar as medições de emissividade em menor tempo que pelo método calorimétrico (cerca de 1 hora), porém para

maior precisão recomenda-se que se aguarde o dispositivo atingir o regime térmico permanente, sendo para isto necessário um tempo maior (cerca de 8 horas).

A análise de incerteza experimental dos resultados obtidos com o dispositivo desenvolvido indica que, neste caso, podem-se esperar medidas com menor incerteza na medição da emissividade pelo método radiométrico, do que pelo método calorimétrico.

A Figura 7.6 apresenta medidas efetuadas com o método radiométrico.

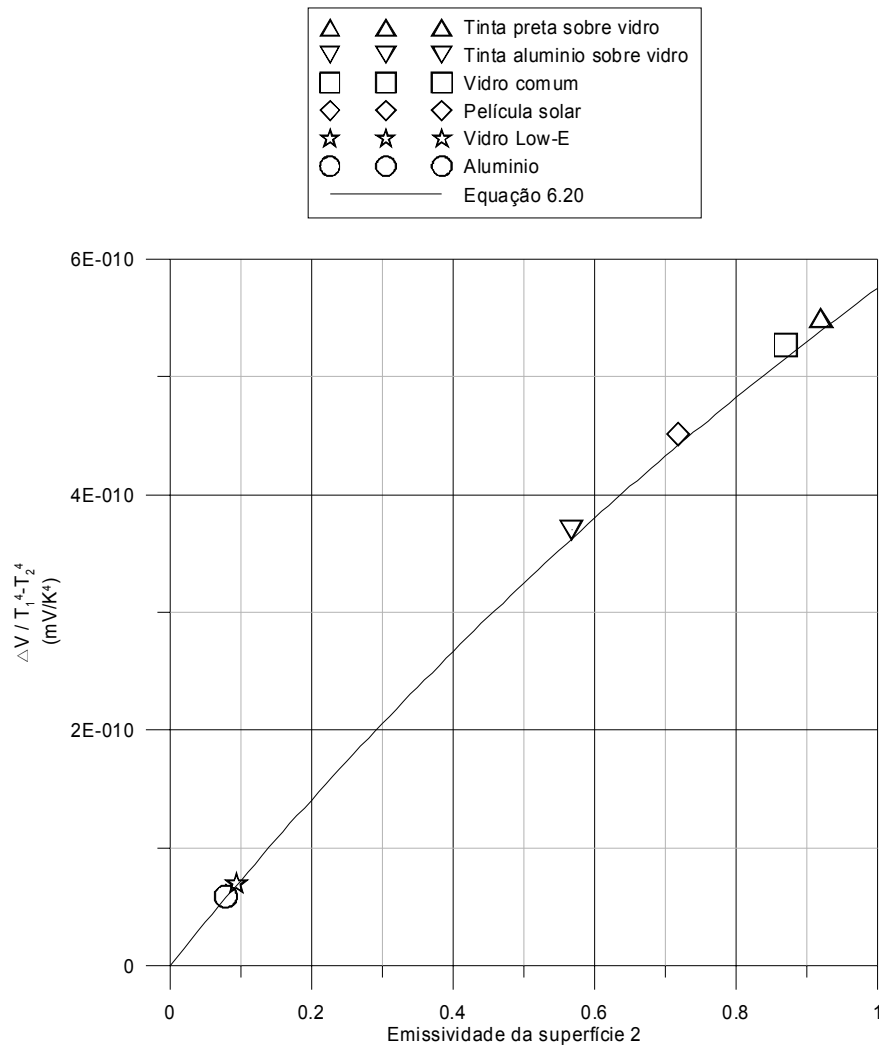


Figura 7.6. Medições de emissividade efetuadas pelo método radiométrico com diferentes amostras.

## 8. CONCLUSÕES

Emissividade é uma propriedade muito difícil de ser medida. Para obtenção de valores precisos de emissividade se faz necessário a utilização de equipamentos complexos, acoplados a uma instrumentação de alta precisão. A completa descrição de uma superfície requer uma enorme quantidade de dados. Normalmente é exigido conhecimento de propriedades térmicas e radiantes com respostas direcionais e espectrais de todos os componentes do equipamento, como superfícies de cavidades, superfícies de amostras de referência, esferas integradoras, prismas, espelhos, lentes, superfícies de sensores, filtros, etc.

É impossível isolar totalmente o sistema de medições da influência externa e interna, sejam elas, térmicas, radiantes, elétricas, ou magnéticas. Sendo assim, é necessário conhecer o efeito destas múltiplas influências para minimizar e corrigir seus efeitos.

Para medidas de propriedades radiantes, normalmente utilizam-se procedimentos para tentar isolar o sistema de medições destas influências indesejáveis. Podem ser utilizados artifícios como guarda térmica e vácuo, minimizando as parcelas de transferência de calor por condução e convecção, ressaltando a parcela transferência de calor por radiação.

Por simplicidade de construção, no medidor de emissividade desenvolvido utilizam-se apenas dois artifícios para minimizar efeitos térmicos indesejáveis: a guarda térmica, e a montagem na posição horizontal. A guarda térmica foi utilizada para garantir um fluxo de calor radiante unidirecional conhecido entre duas superfícies. A cavidade radiante cilíndrica é mantida na posição horizontal com a superfície quente na parte superior, e a amostra na parte inferior, ficando o ar de dentro da cavidade termicamente estratificado, sendo assim, plausível considerar que não existe dentro da cavidade transferência de calor por convecção, ocorrendo uma parcela indesejável de transferência de calor somente por condução.

Outra parcela indesejável de transferência de calor ocorre por condução desviada através do corpo físico do calorímetro, que não é perfeitamente isolado.

Sendo assim, é importante o conhecimento da existência destes dois caminhos de transferência de calor por condução para que se possam corrigir seus efeitos. A parcela de transferência de calor por condução através do ar é determinada analiticamente, enquanto a parcela de transferência de calor por condução desviada através do corpo do calorímetro é determinada experimentalmente.

O objetivo do trabalho foi realizado de maneira satisfatória. O equipamento foi desenvolvido e avaliado, e apesar de ser baseado em conceitos básicos de transferência de calor, e possuir uma construção simples, o instrumento construído é capaz de determinar o valor da

emissividade hemisférica total de diversas superfícies em temperaturas próximas da temperatura ambiente.

A metodologia utilizada permite a determinação da emissividade de amostras em temperaturas próximas de 300 K, isto é, sem a necessidade de que as amostras sejam aquecidas. Isto garante que as propriedades radiantes da superfície da amostra de interesse não sejam alteradas ou até mesmo danificadas como, por exemplo, no caso de amostras de tintas, filmes plásticos, etc. Estas medidas de emissividade em temperaturas próximas da ambiente são bastante importantes para análise do comportamento térmico de ambientes dedicados ao conforto, e ainda em processos de conversão de energia solar em baixa temperatura.

O referido equipamento efetua medidas de emissividade de maneira comparativa a materiais de referência, porém estas informações são obtidas uma única vez, no momento da calibração. Uma vez concluída a calibração, estes valores são armazenados no modelo matemático do equipamento, permitindo que sejam feitas medidas futuras em apenas uma etapa, sem a necessidade de realizar novamente medidas com padrões de referência.

O modelo matemático possibilita a entrada de valores da condutividade térmica e da espessura de amostras multicamadas, permitindo fazer medições de amostras planas espessas e de baixa condutividade térmica, como por exemplo, o vidro com películas para proteção solar, películas de baixa emissividade, etc.

O equipamento desenvolvido permite medição de materiais reais de interesse que muitas vezes não estão tabelados, ou não correspondem a valores disponíveis na literatura, como por exemplo, no caso do desenvolvimento de tintas e revestimentos para obtenção de características radiantes especiais.

Foram medidos alguns materiais cujos valores esperados de emissividade se encontram tabelados em publicações de uso na engenharia. Diversos ensaios foram feitos para cada amostra, e foi possível observar que os dados não se repetem apesar de estarem dentro das incertezas previstas. Possivelmente repetindo as experiências várias vezes e fazendo uso de tratamentos estatísticos será possível obter melhores resultados.

As medidas efetuadas pelo método calorimétrico são bastante demoradas, levando o tempo de aproximadamente oito horas para obtenção de uma medida de emissividade. Este é o tempo necessário para que o calorímetro possa atingir o regime quase permanente. Podem ser obtidas medidas através do método radiométrico em tempo menor que uma hora, porém maior repetibilidade são observadas entre medidas realizadas após o sistema ter atingido o regime quase permanente. Para redução do tempo de resposta o equipamento poderia ser construído com menores dimensões e menor massa, reduzindo a capacidade térmica.

O equipamento mede tanto amostras com alta emissividade, como amostras com baixa emissividade. Através do método calorimétrico são obtidos melhores resultados em amostras de alta emissividade, onde a incerteza experimental percentual é da ordem de 15% da medida, sendo que os resultados obtidos em amostras com valores de emissividade baixos possuem altos valores percentuais de incertezas da ordem de 85% da medida. A análise de incertezas realizada para os resultados obtidos através do método radiométrico, mostra valores de incertezas da ordem de 6%, tanto para amostras com baixa emissividade como para amostras de alta emissividade.

A instrumentação utilizada é de muito boa qualidade permitindo fazer medições deste tipo com resultados de confiabilidade, porém ainda com valores de incertezas elevados para algumas aplicações de engenharia onde se deseja utilizar o valor da emissividade. A análise de incertezas mostrou que entre as medidas primárias (parâmetros dimensionais, medidas de temperatura, medidas de tensão) realizadas para obtenção da emissividade, as incertezas nas medidas de temperatura são as que mais contribuíram nos grandes valores de incertezas das medidas de emissividade. Para melhorar resultados, poderiam utilizar-se sensores de temperatura com menores valores de incerteza associados, como, por exemplo, sensores tipo PT100, minimizando assim as incertezas nas medidas de emissividade.

### 8.1. Sugestões para futuros trabalhos

- Dar continuidade a medidas sistemáticas utilizando materiais diversos;
- Avaliar e controlar melhor as condições ambientais do experimento (temperatura e umidade do ar);
- Aumentar emissividade da superfície quente emissora, para valor mais próximo de 1, testando diferentes tintas e recobrimentos, ou ainda utilizando "efeito cavidade" para aumento da emissividade aparente;
- Calibrar o instrumento utilizando padrões já calibrados em outros laboratórios;
- Melhorar construção mecânica do equipamento melhorando a repetibilidade de condições dimensionais no posicionamento das amostras;
- Adaptar novos sensores de temperatura ao instrumento, substituindo sensores de temperatura tipo termopar existentes por sensores tipo PT100, para minimizar valores de incertezas nas medidas de emissividade;
- Desenvolver e avaliar melhor o comportamento dos sensores radiométricos utilizados, linearidade, resposta espectral, níveis de ruído, realizar seleção apurada de sensores, etc;
- Construir um calorímetro com dimensões menores, para diminuição da capacidade térmica, e consequentemente redução do tempo de resposta;
- Modelar numericamente todo o calorímetro, considerando nas trocas de calor por radiação, efeitos espectrais e direcionais dos materiais, gradientes de temperatura das superfícies, fluxos de calor tridimensionais, etc.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agilent Technologies, 1999. **User's Guide, Agilent 34970A**, Data Acquisition / Switch Unit.

Alfano, G., 1972. “**Apparent Thermal Emittance of Cylindrical Enclosures with and without Diaphragms**”, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.15, no. 12, pp. 2671-2674, 1972.

Alfano, G., e A. Sarno, 1975. “**Normal and Hemispherical Thermal Emittance of Cylindrical Cavities**”, ASME Journal of Heat Transfer, vol.97, no. 3, pp. 387-390, 1975.

ASTM, 1971. “**Standart Test methods for Total Normal Emittance of Surfaces Using Inspection-Meter Techniques**”, E408 - 71 (reapproved 1996), (15.03), American Society for Testing and Materials.

ASTM, 1971. “**Standart Test methods for Normal Spectral Emittance at elevated Temperatures of Nonconducting Specimens**”, E423 - 71 (reapproved 1996), (15.03), American Society for Testing and Materials.

ASTM, 1971. “**Standart Test methods for Calorimetric Determination of Hemispherical Emittance and the Ratio Solar Absorptance to Hemispherical Emittance Using Solar Simulation**”, E434 - 71 (reapproved 1996), (15.03), American Society for Testing and Materials.

ASTM, 1972. “**Standart Test methods for Normal Spectral Emittance at Elevated Temperatures**”, E307 - 72 (reapproved 1996), (15.03), American Society for Testing and Materials.

ASTM, 1995. “**Standart Test methods for Total Hemispherical Emittance of Surfaces From 20 to 1400 °C**”, C835 - 95, (04.06), American Society for Testing and Materials.

ASTM, 1997. **“Standart Test methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers”**, E1933 - 97, (03.03), American Society for Testing and Materials.

ASTM, 1997. **“Standart Specification for Sheet Radiant Barriers for Building Construction Applications”**, C1313 - 97, (04.06), American Society for Testing and Materials.

ASTM, 1997. **“Standart Test methods for Determination of Emittance Materials Near Room Temperature Using Portable Emisometers”**, C1371 - 97, (04.06), American Society for Testing and Materials.

ASHRAE, 2005. **“Handbook Fundamentals”**, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Chapter 14 (Measurement and Instruments), Chapter 31 (Fenestration).

Bedford, R. E., 1988. **“Calculation of effective emissivities of cavity sources of thermal radiation”** em DeWitt, D. P., Nutter, G. D., 1988. **“Theory and Practice of Radiation Thermometry”**, cap. 12, John Wiley & Sons, New York.

Beens, W. W., et al., 1980. **“An Emisometer with accuracy for determination of local hemispherical emittance of surfaces”**, J. Phys., vol. 13.

Bejan, A, 1996. **“Transferência de Calor”**, Ed. Edgard Blücher LTDA, São Paulo.

Dereniak, E. L., Boreman, G. D., 1996. **“Infrared Detectors and Systems”**, John Wiley & Sons, New York.

Devices& Services Company. **“Emisometer Model AE”**, 10024 Monroe Drive, Dallas, Texas.

DeWitt, D. P., et al, 1986. **“Evaluation of a Method for Measuring Spectral Emissivity at Moderate Temperatures”**, J. Thermophysics, vol.1, no. 3.

Duffie, J. A., Beckman, W. A., **“Solar Engineering of Thermal Processes”**, John Wiley & Sons, New York.



Edwards, D.K., 1983. “**Surface Radiation Characteristics**”, capítulo 2.9.2; Heat Exchanger Design Handbook, Hemisphere Publishing Corporation.

Holman, J. P., 1997. “**Heat Transfer**”, 8º ed., McGraw-Hill, New York.

Holman, J. P., 2001. “**Experimental Methods for Engineers**”, 7º ed., McGraw-Hill International Edition, New York.

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., 2003. “**Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**”, 5º edição, LTC Editora, Rio de Janeiro.

Kern, D. Q., 1980. “**Processos de Transmissão de Calor**”, Editora Guanabara SA, Rio de Janeiro.

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

Krenzinger, A., 1979. “**Superfícies Seletivas para Conversão Térmica da Energia Solar – Óxidos de Cobre sobre Cobre**”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, PPGEMM, Porto Alegre.

Krenzinger, A., 2004. “**Desenvolvimento de equipamento para determinar a emissividade de superfícies**”, 10º Congresso Brasileiro de Ciências Térmicas, ENCIT 2004, Paper CIT04-0153, Rio de Janeiro.

Krenzinger, A., et al, 2006. “**Desenvolvimento e Calibração de um Pirgeômetro**”, V Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento, e Ventilação do Mercosul, Mercofrio 2006, Paper F1405, Porto Alegre.

Kline, S. J., and McClintock, F. A. “**Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments**”, Mechanical Engineering, pp. 3-9, 75, 1, January, 1953.

Klaus-Dieter Gruner.,2003. “**Principles of Non-Contact Temperature Measurement**”, Raytek GmbH

Marks, L. S., Avallone, E., A, Baumeister III, T., 1996. “**Marks' Standart Handbook for Mechanical Engineers**”, 10ª edição, McGraw-Hill International Edition, New York.

McLellan, G., W., Shand, E., B., 1984. “**Glass Engineering Handbook**”, 3ª edição, McGraw-Hill International Edition, New York.

Modest, M. F., 1993. “**Radiative Heat Transfer**”, McGraw-Hill International Edition, New York.

Özisik, M. N., 1990. “**Transferência de Calor**”, Editora Guanabara Koogan SA, Rio de Janeiro.

Programa “**EES - Engineering Equation Solver**”, versão 6867-3D, 2003. Klein, S. A.

Programa “**IHT - Iterative Heat Transfer**”, versão 2.0, 2002. Intellpro Inc, John Wiley & Sons, New York.

Raytec, 2003. Klaus-Dieter Gruner. “**Principles of Non-Contact Temperature Measurement**”.

Rubin, M., 1985. “**Optical Properties of Lime Silica Glasses**”, Solar Energy Materials, vol. 12, pg. 275-288.

Schunck, M., 1983. “**Emissivity of solids**”, capítulo 5.4.4; Heat Exchanger Design Handbook, Hemisphere Publishing Corporation.

Schmidt, E., e Eckert, E., 1935. “**Über die Richtungsverteilung der Wärmestrahlung von Oberflächen**”, Forsch. Ingenieurwes, vol. 6 pg.175-183.

Siegel, R., Howell, J. R., 2002. “**Thermal Radiation Heat Transfer**”, Taylor & Francis, New York.

Sparrow, E. M., Cess, R. D., 1970. “**Radiation Heat Transfer**”, Brooks/Cole Publishing Company Belmont, California.

Synder, N. W., Gier, J. T., Dunkle, R.V., 1955. **“Total Normal Emissivity Measurements on Aircraft Materials between 100 and 800 °F”**, Trans. ASME, vol.77, p.1011.

VDI/VDE Richtlinie. **“Technische Temperaturmessungen-Strahlungsthermometrie”**, VDI 3511 Page 4. January, 1995.

Wiebelt, J. A., 1966. **“Engineering Radiation Heat Transfer”**, Holt, Rinehart and Winston, New York.

## 10. ANEXOS

### Anexo A1. Valores de emissividade do vidro e do alumínio

O vidro e alumínio foram utilizados como materiais de referência na calibração do referido dispositivo para medição de emissividade pelo método calorimétrico e radiométrico. A Tabela 7.2 apresenta os valores de emissividade hemisférica total considerados válidos neste trabalho. Seguem algumas considerações sobre valores encontrados na literatura.

Alguns manuais e livros de transferência de calor apresentam para o vidro, valores próximos de  $\sim 0,94$  para a emissividade normal, a  $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Na Figura A1.1 observa-se que a emissividade direcional do vidro é cerca de  $0,94$  para ângulos de  $0$  a  $\sim 45^{\circ}$ , e vai diminuindo até zero para ângulo de  $90^{\circ}$  com a normal. Schmidt (1935) apresenta que a emissividade hemisférica, representada pela média integral desta curva, resulta num valor de  $\sim 0,876$ , a  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  (cerca de  $7\%$  menor que a emissividade normal).

Rubin (1985) cita que estes valores próximos de  $\sim 0,94$  foram medidos na Alemanha antes da 2<sup>o</sup> Guerra Mundial em espectrofotômetros que não operavam além do comprimento de onda  $15\text{ }\mu\text{m}$  (Figura A1.2). Em seus experimentos Rubin (1985), estendeu a faixa de medições até comprimento de onda  $100\text{ }\mu\text{m}$ , e observou que o vidro possui um aumento da refletividade entre  $15$  e  $21\text{ }\mu\text{m}$  (ver Figura A1.3), e conseqüentemente por ser opaco nesta faixa espectral (ver Figura A1.4), possui uma diminuição da emissividade espectral, resultando neste caso um valor de emissividade hemisférica menor que quando se integrava a emissividade espectral somente até o comprimento de onda  $15\text{ }\mu\text{m}$ .

Rubin (1985) avaliou diversas amostras de vidro com um Espectrômetro Transformada de Fourier IBM, e determinou como resultado da média de todas as amostras medidas que o valor de emissividade hemisférica do vidro é de  $0,837$ , a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Ashrae (2005) considera que a emissividade hemisférica do vidro comum é  $0,84$  para comprimentos de onda na faixa de  $0,4$  a  $40\text{ }\mu\text{m}$ .

Nesta dissertação é considerado que a emissividade hemisférica do vidro comum utilizado como amostra de referência é  $\sim 0,84$ .

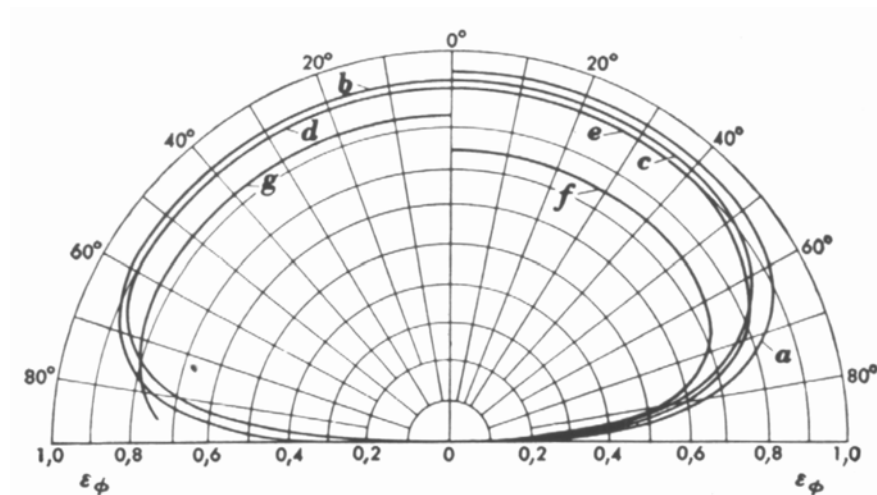


Figura A1.1 Distribuição da emissividade direcional de materiais não metálicos (a) Gelo, (b) Madeira, (c) Vidro, (d) Papel, (e) Argila, (f) Cobre oxidado, (g) Alumínio oxidado (Schmidt, 1935)

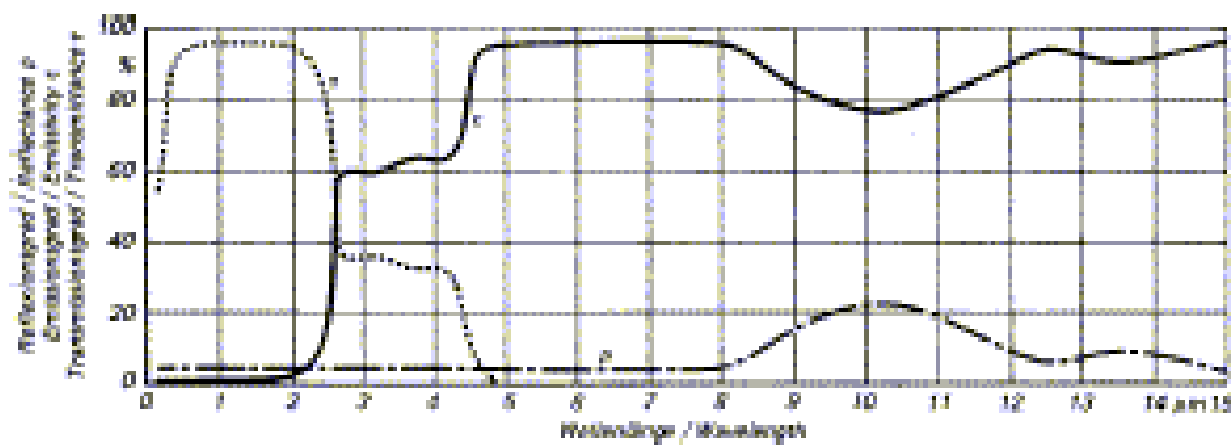


Figura A1.2 Propriedades radiantes do vidro, na faixa espectral de 0 e 15  $\mu\text{m}$ : transmissividade (linha pontilhado), emissividade (linha contínua), refletividade (linha traço-ponto) (Raytec, 2003)

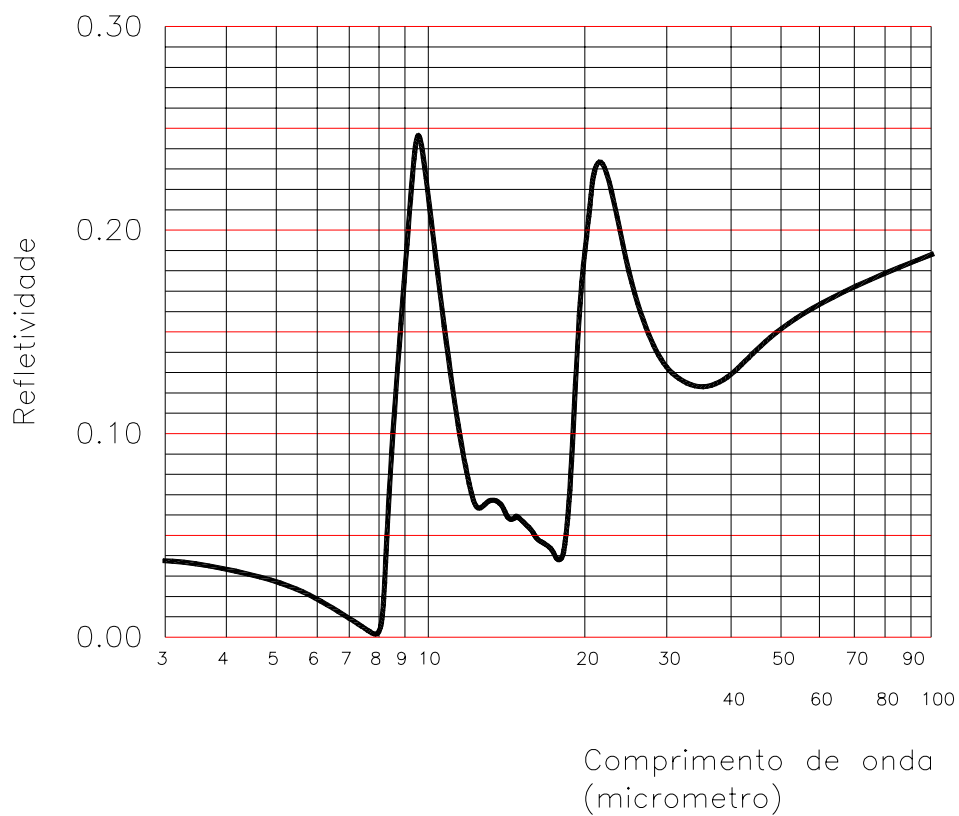


Figura A1.3. Refletividade espectral de um vidro claro típico (Rubin, 1985)

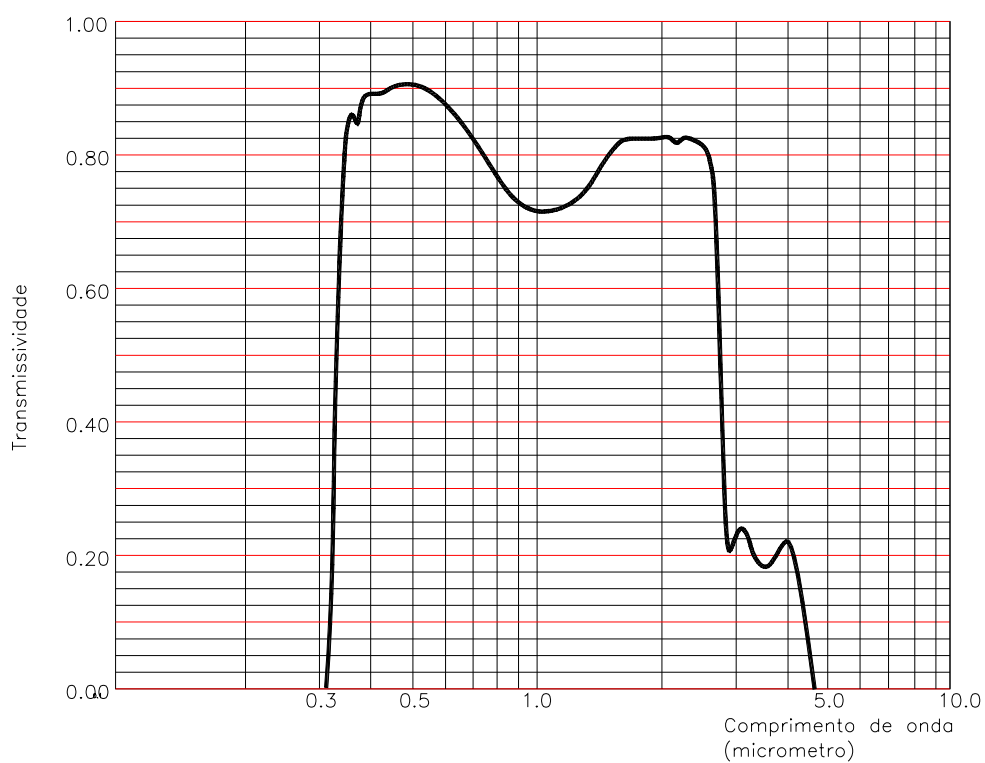


Figura A1.4. Transmissividade espectral de um vidro claro típico (Rubin, 1985)

Para o alumínio foram utilizados os seguintes dados. A Tabela A1.1 e a Figura A1.5 apresentam a emissividade espectral do alumínio. A Figura A1.6 apresenta a emissividade direcional para o alumínio, onde observa-se que a emissividade direcional do alumínio é cerca de 0,04 para ângulos de 0 a  $\sim 38^\circ$ , e vai aumentando até 0,14 para ângulo de  $\sim 83^\circ$  com a normal. A emissividade hemisférica, representada pela média integral desta curva, resulta num valor de  $\sim 0,057$  (cerca de 42% maior que a emissividade na direção normal). Neste trabalho é considerado que a emissividade hemisférica da folha de alumínio utilizado como amostra de referência é  $\sim 0,05$ .

Tabela A1.1 Emissividade espectral do alumínio (Gubareff, 1960)

Comprimento de onda	0,6 $\mu\text{m}$	1,8 $\mu\text{m}$	3,6 $\mu\text{m}$	5,4 $\mu\text{m}$	9,3 $\mu\text{m}$
Emissividade do alumínio polido	$\sim 0,3$	0,19	0,08	0,05	0,04

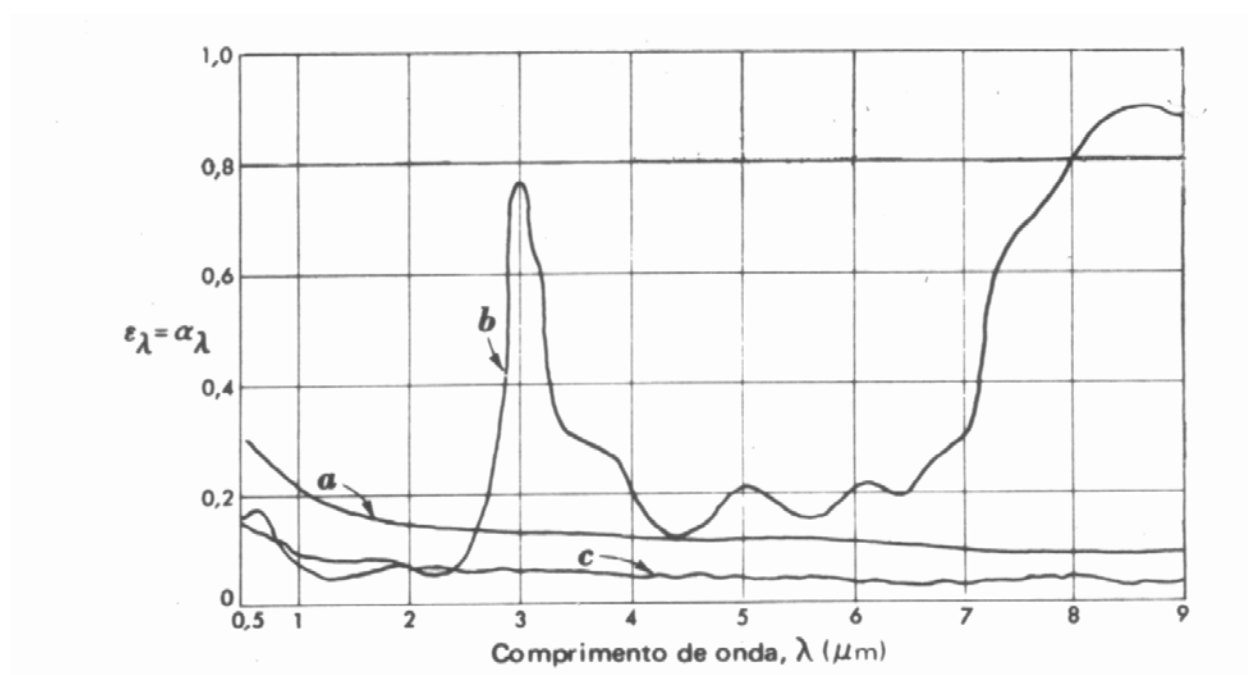


Figura A1.5 Emissividade espectral de materiais metálicos (a) alumínio polido, (b) alumínio anodizado, (c) cobre polido (Sieber, 1941)

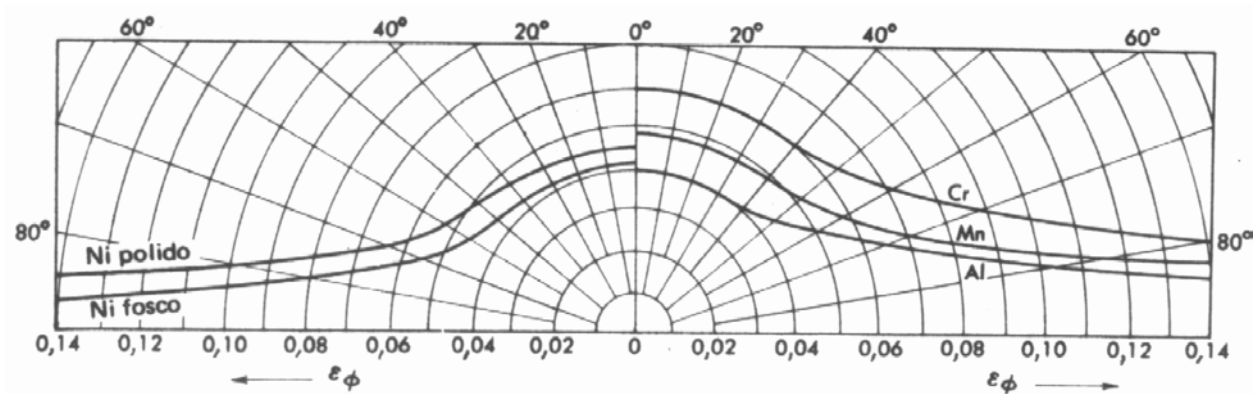


Figura A1.6 Distribuição da emissividade direcional de materiais metálicos: Al, Cr, Mn, Ni (Schmidt, 1935)



## Anexo A2. Efeito cavidade para aumento de emissividade

Em aplicações onde é desejável aumentar a emissividade de alguma superfície (buscando assim aproximar a emissividade à do corpo negro) pode-se utilizar o efeito cavidade. Artifícios para aumento da emissividade são importantes no projeto e fabricação de cavidades para simulação de corpo negro.

Pode-se definir uma emissividade aparente como sendo

$$\varepsilon_a = \text{Emissividade aparente} = \frac{\text{Energia emitida pela abertura da cavidade}}{\text{Energia emitida pelo corpo negro}} \quad (\text{A2.1})$$

ou ainda como

$$\varepsilon_a = \frac{q_{\text{cavidade}}}{q_{\text{negra}}} = \frac{q_{\text{cavidade}}}{\sigma A_o (T_{\text{parede}}^4 - T_{\infty}^4)} \quad (\text{A2.2})$$

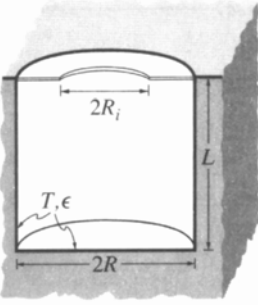
onde  $q_{\text{cavidade}}$  representa a emissão radiante da abertura da cavidade, e  $q_{\text{negra}}$  a emissão radiante de uma superfície negra de área  $A_o$ , onde  $A_o$  representa a superfície plana fictícia da abertura da cavidade, e  $T_{\text{parede}}$  a temperatura da parede da cavidade (considerada isotérmica), e  $T_{\infty}$  a temperatura da vizinhança que troca calor com a cavidade.

Se parte da abertura de uma cavidade cilíndrica é coberto por um anel plano com uma pequena abertura, a cavidade pode funcionar como um corpo negro. Este problema foi estudado por Alfano, 1972 e Alfano e Sarno, 1975 (apud Modest, 1993), sendo que a Tabela A2.1, apresenta um resumo dos resultados obtidos para valores de emissividade aparente em uma cavidade cilíndrica, parcialmente coberta, com paredes isotérmicas, em diversas configurações geométricas. A Figura A2.1 apresenta o desenho de uma configuração exemplo retirada da Tabela A2.1.

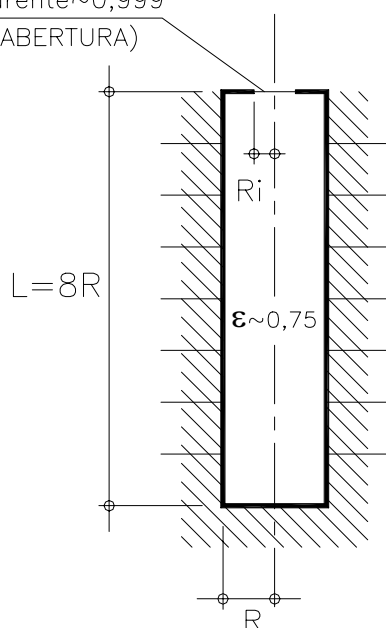
Sparrow, 1970 cita vários artigos da literatura científica que analisam cavidades de diversos tipos e geometrias, que servem de artifício para aumento de emissividade aparente. A Figura A2.2 apresenta algumas destas geometria e gráficos para emissividade aparente resultante, para reflexão difusa e especular, em função de parâmetros geométricos das cavidades.

Tabela A2.1 Valores de emissividade aparente para uma cavidade cilíndrica, parcialmente coberta, com paredes isotérmicas (tabela adaptada de Modest, 1993).

$\epsilon$	$R_i/R$	$\epsilon_a$		
		$(L/R = 2)$	$(L/R = 4)$	$(L/R = 8)$
0.25	0.4	0.916	0.968	0.990
	0.6	0.829	0.931	0.981
	0.8	0.732	0.888	0.969
	1.0	0.640	0.844	0.965
0.50	0.4	0.968	0.990	0.998
	0.6	0.932	0.979	0.995
	0.8	0.887	0.964	0.992
	1.0	0.839	0.946	0.989
0.75	0.4	0.988	0.997	0.999
	0.6	0.975	0.997	0.998
	0.8	0.958	0.988	0.997
	1.0	0.939	0.982	0.996



$\epsilon_{\text{aparente}} \sim 0,999$   
(NA ABERTURA)



UMA CAVIDADE CILÍNDRICA  
COM PARÂMETROS  
GEOMÉTRICOS:

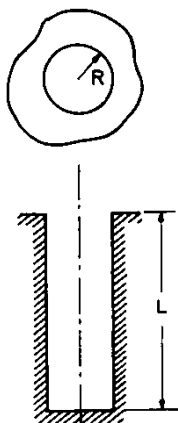
$$L/R=8$$

$$R_i/R=0,4$$

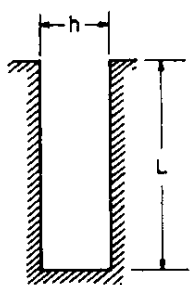
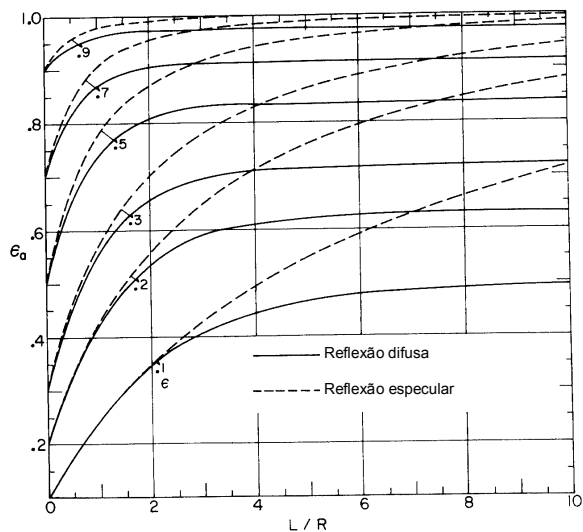
E UMA SUPERFÍCIE INTERNA  
COM EMISSIVIDADE  $\epsilon \sim 0,75$ ,

RESULTA EM UMA ABERTURA COM  
EMISSIVIDADE APARENTE  $\epsilon_a \sim 0,999$

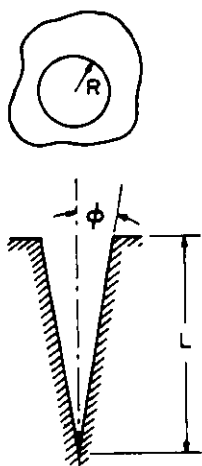
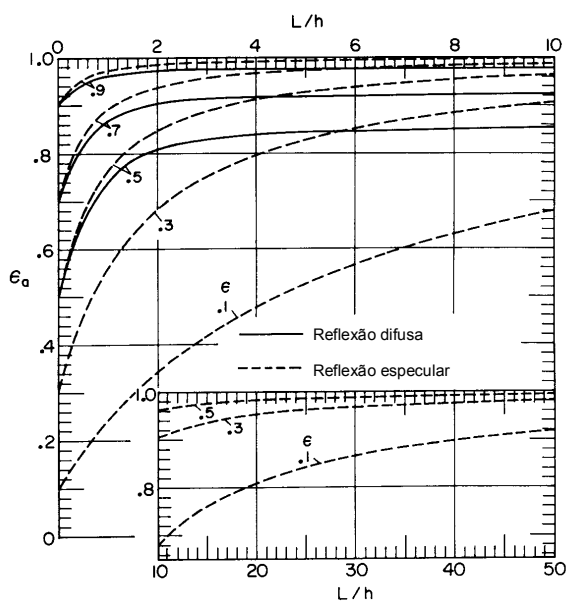
Figura A2.1 Exemplo de configuração de cavidade para aumento de emissividade aparente, conforme Tabela A2.1.



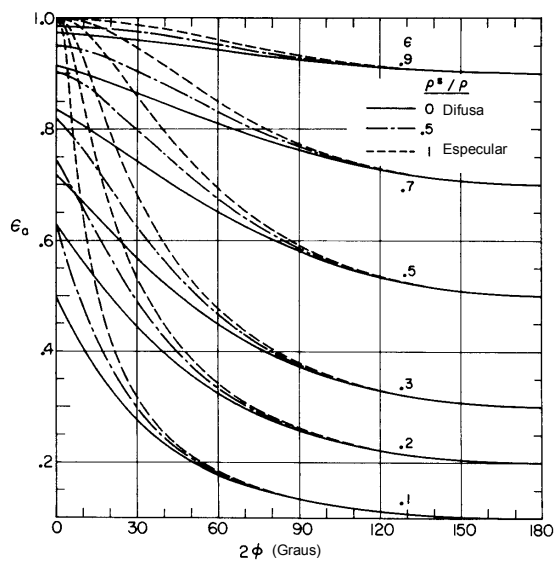
(a) Cavidade cilíndrica circular



(b) Cavidade ranhura retangular



(c) Cavidade cônica



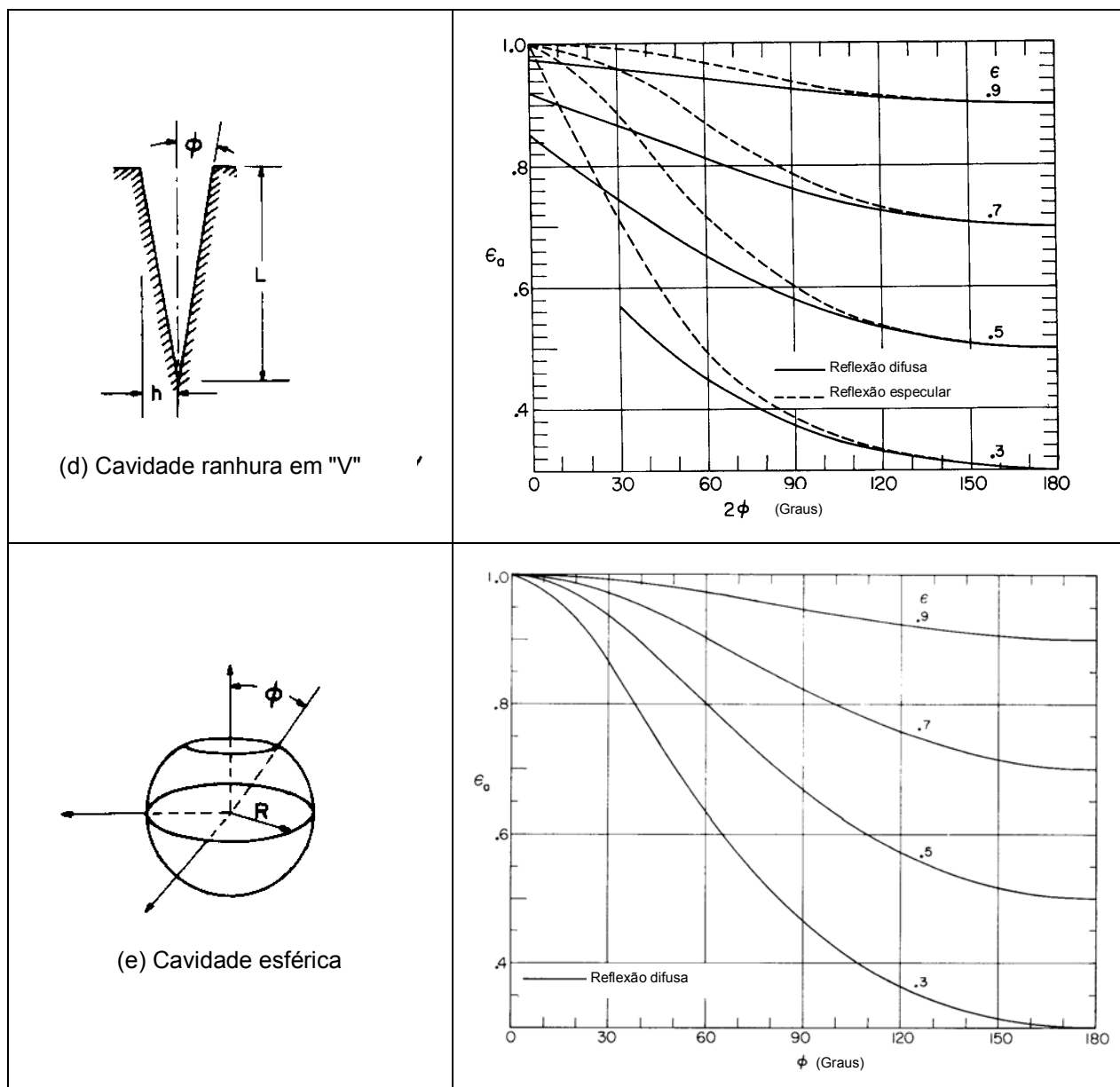


Figura A2.2 Várias configurações de cavidades e emissividade aparente (adaptado de Sparrow, 1970).