



**PPGEM**

**Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – PPGEM**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE SUPERFÍCIES REFLETIVAS  
NAS PERDAS DE CALOR DE SISTEMAS TÉRMICOS**

**Marcos Alexandre de Vasconcelos Cavalcanti**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do grau em MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

**Orientador:** Profº. Dr. José Ubiragi de Lima Mendes

Natal  
Fevereiro/2011

Catálogo da Publicação na Fonte. UFRN / Biblioteca Setorial de  
Engenharia Mecânica

Cavalcanti, Marcos Alexandre de Vasconcelos.

Análise da influência de superfícies refletivas nas perdas de calor de sistema térmicos/ Marcos Alexandre de Vasconcelos Cavalcanti. – Natal, RN, 2011.

83f.: il.

Orientador: José Ubiragi de Lima Mendes.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de pós-graduação em Engenharia de Mecânica.

1. Superfícies refletivas – Dissertação. 2. Isolamento térmico – Dissertação. 3. Aço inoxidável – Dissertação. 4. Perdas de calor – Dissertação. I. Mendes, José Ubiragi de Lima. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

RN/UF/BSEEM

CDU 699.86

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE SUÉRFÍCIEIS REFLETIVAS NAS PERDAS DE  
CALOR DE UM SISTEMA**

**Marcos Alexandre de Vasconcelos Cavalcanti**

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA  
sendo aprovada em sua forma final.**

**Dr. José Ubiragi de Lima Mendes  
Orientador**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. José Ubiragi de Lima Mendes – Presidente**

---

**Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza**

---

**Prof. Dr. Roberto Silva de Souza**

"Se não puder se destacar pelo talento, vença pelo  
esforço".

**Dave Weinbaum**

**Dedico este trabalho a todos aqueles que  
de um modo ou de outro ajudaram  
na concretização de mais uma  
etapa da minha vida.**

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus pela razão do meu ser e por ter me dado forças para subir mais um degrau nesta escada da vida.

Ao professor Dr. José Ubiragi de Lima Mendes, pelas brincadeiras, pela paciência, pela amizade e orientação na realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza da UFRN – PPGEM, pela utilização de equipamentos e materiais do laboratório.

A CAPES, pela concessão da bolsa de pesquisa durante todo o período de mestrado e a Universidade Federal do Rio Grande do Norte por ter cedido o espaço para a realização da minha pesquisa.

A empresa BRASINOX, pela doação das chapas de aço inox polido para construção do sistema térmico, objeto deste estudo.

Aos meus pais, pela força que sempre me deram nos meus estudos e por serem um braço forte em que posso sempre me apoiar nos momentos que eu mais precisar.

As minhas irmãs, por sempre estarem presentes no meu dia-a-dia.

A minha namorada, pelo carinho e amor a mim dedicado e por ter me dado sempre apoio nos momentos difíceis.

Aos colegas de mestrado, pela amizade, pelas brincadeiras, pelo companheirismo e pelo apoio durante toda essa fase.

A todos os meus amigos e amigas que me deram incentivos nos momentos difíceis e que contribuíram indiretamente para a realização deste trabalho.

Obrigado a todos!

## SUMÁRIO

LISTA DE SIMBOLOS .....	i
LISTA DE FIGURAS .....	iii
LISTA DE TABELAS.....	v
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
1. INTRODUÇÃO.....	2
1.1. Apresentação do trabalho.....	2
1.2. Objetivos.....	4
1.2.1. Objetivo Geral.....	4
1.2.2. Objetivos Específicos.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Conceitos de isolamento térmico.....	6
2.2. Isolamento resistivo.....	6
2.2.1. Lã de vidro.....	7
2.2.1.1. Características da lã de vidro.....	8
2.3. Isolantes refletivos e barreiras radiantes.....	8
2.4. Aplicações dos isolantes refletivos e barreiras radiantes.....	11
2.5. Perdas de calor em sistemas térmicos.....	14
2.5.1. Regime transiente.....	14
2.5.2. Regime estacionário.....	15
2.6. Mecanismos de transferência de calor.....	15
2.7. Transferência de calor combinada.....	16
2.7.1. Transferência de calor por condução.....	17
2.7.2. Transferência de calor por convecção.....	18
2.7.3. Transferência de calor por radiação.....	19
2.8. Cálculo para determinação da transferência radiativa em sistemas com múltipla superfícies refletivas.....	20
2.9. Intensidade de radiação.....	21
2.10. Poder Emissivo.....	23

2.11. Radiosidade.....	24
2.12. Propriedades radiantes de superfícies.....	25
2.12.1. Emissividade.....	25
2.12.2. Absorção, reflexão e transmissão.....	28
2.12.3. Absortividade.....	29
2.12.4. Refletividade.....	31
2.12.5. Transmisividade.....	33
2.13. Superfícies opacas, semitransparentes e transparentes.....	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1. Materiais e procedimentos utilizados para a construção do sistema térmico experimental.....	36
3.2. Montagem do sistema sem a presença de vácuo.....	38
3.3. Montagem do sistema com a presença de bomba de vácuo.....	41
3.4. Montagem do sistema com a presença de lã de vidro.....	42
3.5. Determinação da refletividade da superfície da chapa de aço inox 430.....	44
3.6. Determinação da emissividade da chapa de aço inox 430.....	46
4. ANÁLISE DE RESULTADOS.....	50
4.1. Ensaio da medição de emissividade do aço inox 430.....	50
4.2. Ensaio da medição de refletividade da superfície da chapa de aço inox 430.....	51
4.3. Ensaio da medição de temperatura no sistema com barreira radiante sem vácuo.....	52
4.4. Ensaio da medição de temperatura no sistema com barreira radiante com vácuo.....	55
4.5. Ensaio da medição de temperatura no sistema com a utilização de lã de vidro.....	59
4.6. Comparativo do tempo de estabilização das temperaturas nas três configurações de isolamento.....	59
4.7. Comparativo da diferença de temperatura no regime permanente das superfícies 1 e 6 de cada modo de isolamento.....	61
4.8. Comparativo das perdas de calor dos três modos de isolamento do sistema térmico experimental.....	62
4.9. Eficiência dos sistemas de isolamento térmico.....	63
5. CONCLUSÕES.....	65
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Área transversal	[m <sup>2</sup> ]
Gr	Número de Grashof	Adimensional
G	Gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
G	Irradiação	[W/m <sup>2</sup> ]
G <sub>λ</sub>	Irradiação espectral	[W/m <sup>2</sup> .μm]
G <sub>λ,abs</sub>	Fração da irradiação absorvida	[W/m <sup>2</sup> .μm]
G <sub>λ,ref</sub>	Fração da irradiação refletida	[W/m <sup>2</sup> .μm]
G <sub>λ,tr</sub>	Fração da irradiação transmitida	[W/m <sup>2</sup> .μm]
h	Coefficiente de convectividade	[W/m <sup>2</sup> K]
I	Intensidade de radiação	[W/m <sup>2</sup> .sr]
I <sub>λ,e</sub>	Intensidade de radiação espectral	[W/m <sup>2</sup> .sr.μm]
J	Radiosidade	[W/m <sup>2</sup> ]
J <sub>λ</sub>	Radiosidade espectral	[W/m <sup>2</sup> .μm]
K	Condutividade térmica	[W/mK]
L	Espessura da parede	[m]
L	Altura da placa	[m]
N	Número de barreiras radiante	Adimensional
Pr	Número de Prandtl	Adimensional
q <sub>condução</sub>	Transferência de calor por condução	[W]
q <sub>convecção</sub>	Transferência de calor por convecção	[W]
q <sub>radiação</sub>	Transferência de calor por radiação	[W]
T	Temperatura	[°C ou K]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> ]
λ	Comprimento de onda	[μm]
α <sub>λ,θ</sub>	Absortividade direcional espectral	Adimensional
ρ <sub>λ,θ</sub>	Refletividade direcional espectral	Adimensional

$\tau_{\lambda,\theta}$	Transmissividade direcional espectral	Adimensional
$\beta$	Coefficiente de dilatação térmica do fluido	[1/K]
$\nu$	Viscosidade do fluido	[m <sup>2</sup> /s]
$\tau$	Transmissividade	Adimensional
$\epsilon$	Emissividade	Adimensional
$\rho$	Refletividade	Adimensional
$\alpha$	Absortividade	Adimensional

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Placas de lã de vidro.....	8
Figura 2.2. Vista da barreira radiante e o telhado.....	9
Figura 2.3. Barreira de radiação térmica de alumínio.....	11
Figura 2.4. Edifício Spazio JK, vidro laminado refletivo prata.....	12
Figura 2.5. Forno elétrico para tratamento térmico.....	12
Figura 2.6. Lâmina metálica brilhante, PENTAK, Reflexfoil HD 2.....	13
Figura 2.7. Esquema representativo dos modos combinados de transferência de calor.....	17
Figura 2.8. Esquema representativo da troca de radiação entre planos paralelos e barreiras radiantes.....	20
Figura 2.9. Ângulo sólido em uma parte sobre $dA_1$ subtendido por $dA_n$ , em um sistema de coordenadas esféricas.....	23
Figura 2.10. Radiosidade da superfície.....	25
Figura 2.11. Diagrama ilustrativo dos parâmetros que afetam a emissividade.....	28
Figura 2.12. Processos de absorção, reflexão e transmissão associados a um meio semitransparente.....	30
Figura 2.13. Reflexão difusa e especular.....	34
Figura 3.1. Chapas de aço inox 430 montada em bases de madeira.....	36
Figura 3.2. Fixação dos termopares nas chapas de aço inox 430.....	37
Figura 3.3. Desenho esquemático dos termopares nas superfícies das chapas.....	37
Figura 3.4. Placas de EPS fixadas no sistema para concentração de calor da fonte geradora.....	38
Figura 3.5. Termopares conectados aos termômetros digitais.....	39
Figura 3.6. Fixação sequencial dos termopares nas superfícies das chapas de inox.....	40
Figura 3.7. Ensaio de medição de temperatura do sistema sem a presença de vácuo.....	40
Figura 3.8. Bomba de vácuo diafragma.....	41
Figura 3.9. Ensaio de medição de temperatura no sistema com presença de vácuo.....	42
Figura 3.10. Manta de lã de vidro introduzida entre as chapas.....	43
Figura 3.11. Ensaio de medição de temperatura no sistema com presença de lã de vidro.....	43

Figura 3.12. Desenho esquemático de medição da intensidade de radiação refletida.....	44
Figura 3.13. Medição de intensidade radiativa refletida.....	45
Figura 3.14. Medição direta de intensidade de radiação.....	45
Figura 3.15. Medição da temperatura de contato da superfície.....	47
Figura 3.16. Medição da emissividade da superfície.....	48
Figura 3.17. Instrumento de medição da emissividade dos materiais.....	48
Figura 4.1. Gráfico de Emissividade x Temperatura.....	50
Figura 4.2. Gráfico da intensidade refletida x Ângulo de incidência.....	52
Figura 4.3. Posição dos termopares nas superfícies da chapa de aço inox.....	53
Figura 4.4. Desenho esquemático do sistema com barreira radiante sem vácuo e dos valores das temperaturas das superfícies em cada chapa.....	54
Figura 4.5. Gráfico (Temperatura x Tempo) – Termômetro I - Sistema com barreira radiante sem vácuo.....	54
Figura 4.6. Gráfico (Temperatura x Tempo) – Termômetro II - Sistema com barreira radiante sem vácuo.....	55
Figura 4.7. Gráfico (Temperatura x Tempo) – Termômetro III - Sistema com barreira radiante sem vácuo.....	55
Figura 4.8. Desenho esquemático do sistema com barreira radiante com vácuo e dos valores das temperaturas das superfícies em cada chapa.....	56
Figura 4.9. Gráfico (Temperatura x Tempo) – Termômetro I - Sistema com barreira radiante e vácuo.....	58
Figura 4.10. Gráfico (Temperatura x Tempo) – Termômetro II - Sistema com barreira radiante e vácuo.....	58
Figura 4.11. Gráfico (Temperatura x Tempo) – Termômetro III - Sistema com barreira radiante e vácuo.....	58
Figura 4.12. Desenho esquemático do sistema com lâ de vidro e dos valores das temperaturas das superfícies em cada chapa.....	59
Figura 4.13. Gráfico (Temperatura x Tempo) – Termômetro I - Sistema utilizando lâ de vidro.....	60
Figura 4.14. Gráfico (Temperatura x Tempo) – Termômetro III - Sistema utilizando lâ de vidro.....	60

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1. Propriedades térmicas dos principais isolantes resistivos.....	6
Tabela 2.2. Especificações do Reflexfoil HD 2 - PENTAK.....	13
Tabela 2.3. Propriedades térmicas dos metais.....	16
Tabela 2.4. Valores típicos da emissividade dos materiais.....	26
Tabela 4.1. Valores de medição da refletividade da superfície da chapa de aço inox 430 em função do ângulo de incidência.....	51
Tabela 4.2. Temperaturas das superfícies no sistema de barreira radiante sem vácuo no regime permanente.....	53
Tabela 4.3. Temperaturas das superfícies no sistema de barreira radiante com vácuo no regime permanente.....	56
Tabela 4.4. Temperaturas das superfícies no sistema com lã de vidro no regime permanente.....	59
Tabela 4.5. Tempo de estabilização das temperaturas de cada modo de isolamento.....	61
Tabela 4.6. Comparativo da diferença de temperatura máxima do sistema em cada modo de isolamento.....	62
Tabela 4.7. Comparativo do fluxo de calor dos três modo de isolamento do sistema.....	62
Tabela 4.8. Comparativo da eficiência dos modos de isolamento térmico.....	63

## RESUMO

O uso de superfícies refletivas funcionando como isolante térmico tem crescido de forma significativa nos últimos anos. Os isolantes térmicos reflexivos são materiais que possuem como características, baixa emissividade, baixa absorvidade e elevada refletividade no espectro do infravermelho. A utilização desses materiais é uma alternativa que vem sendo incrementada a cada dia, uma vez que esse tipo de isolante tem propriedades radiantes importantes como forma de minimizar as perdas de calor em sistemas de aquecimento, como também em sistemas de climatização quando se tem como finalidade o bloqueio da passagem de calor em coberturas de edificações. Visando analisar a influência dessas superfícies refletivas como forma de reduzir a transferência de calor em sistemas onde se requer a conservação de energia, montou-se um sistema de paredes múltiplas de três superfícies de aço inoxidável 430 espelhado, espaçadas igualmente entre si e que funcionam como barreira radiante. A análise foi feita no sistema com e sem a presença de vácuo e comparados em seguida com análise feita utilizando a lã de vidro entre as mesmas, uma vez que este tipo de isolante além de ser considerado resistivo, é utilizado tradicionalmente no mundo em sistemas térmicos. Foram também medidas experimentalmente a refletividade e emissividade das placas utilizadas. Para a obtenção das medidas de temperatura das superfícies das chapas de aço inox, foi inserido um termopar tipo K fixado em cada superfície a fim de avaliar o comportamento térmico para cada configuração do sistema. Os resultados mostraram que, o uso de superfícies refletivas como uma forma de minimizar as perdas de calor em sistemas térmicos teve uma eficiência de 13%, no entanto, o sistema com presença de vácuo, foi o que obteve o melhor resultado, 60% de eficiência, ambos com relação à utilização de lã de vidro como isolante convencional.

**Palavras-chave:** Superfícies Refletivas, Isolante Térmico, Aço Inoxidável, Perdas de Calor.

## **ABSTRACT**

The use of reflective surfaces functioning as thermal insulator has grown significantly over the years. Reflective thermal insulator are materials that have several characteristics such as low emissivity, low absorptivity and high reflectivity in the infrared spectrum. The use of these materials has grown a lot lately, since it contains several important radioactive properties that minimize the heat loss of thermal systems and cooling systems that are used to block the heat on the roof of buildings. A system made of three surfaces of 316 stainless steel mirror was built to analyze the influence of reflective surfaces as a way to reduce the heat loss and thereby conserve the energy of a thermal system. The system was analyzed both with and without the presence of vacuum, and then compared with a system that contained glass wool between the stainless steel mirror walls, since this isolator is considered resistive and also broadly used around the world in thermal systems. The reflectivity and emissivity of the surfaces used were also measured in this experiment. A type K thermocouple was fixed on the wall of the system to obtain the temperature of the stainless steel mirror surfaces and to analyze the thermal behavior of each configuration used. The results showed an efficiency of 13% when the reflective surfaces were used to minimize the heat loss of the thermal system. However, the system with vacuum had the best outcome, a 60% efficiency. Both of these were compared to the system made of glass wool as a thermal insulator.

**Keywords:** Reflective surfaces, Thermal Insulation, Stainless Steel, Heat loss

---

# **CAPÍTULO 1**

## **Introdução**

---



## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Apresentação do trabalho**

Tradicionalmente, isolar termicamente um sistema, sempre esteve associado à utilização de materiais conhecidos como resistivos ou isolantes térmicos convencionais, que reduzem a transferência de calor por condução. O uso de superfícies refletivas como forma de minimizar as perdas de calor em sistemas térmicos é um novo conceito de conservação de energia no mundo, sendo no Brasil ainda pouco explorado.

Os materiais de superfícies refletivas são considerados isolantes térmicos por reflexão ou barreiras radiantes, pois melhoram a eficiência térmica de um sistema, refletindo o calor radiante ao invés de absorvê-lo sendo fabricados com materiais de alta capacidade de reflexão (alta refletividade) e baixa capacidade de emissão de radiação térmica (baixa emissividade), comportamentos característicos dos metais polidos (DARÉ 2005).

Segundo VITTORINO (2003), dentre os diversos isolantes reflexivos disponíveis no mercado nacional, encontram-se as barreiras radiantes, que começaram a ser utilizadas no Brasil em 1995, importadas de outros países. Embora o uso destes produtos tenha crescido bastante nos últimos anos, ainda não existe uma norma nacional que trate deste assunto especificamente. Essa carência de especificações técnicas fez surgir no mercado produtos que não apresentam características satisfatórias para funcionar como um isolante térmico, trazendo consequentemente prejuízos financeiros aos que utilizam esse tipo de produto.

Os materiais reflexivos, geralmente de alumínio, são aplicados em um ou ambos os lados de uma série de materiais de substrato. Materiais de substrato incluem papel de embalagem, filme plástico, papelão etc. Segundo MEDINA (2000), algumas barreiras radiantes como as folhas de papel de alumínio são normalmente reforçadas com fibra de vidro para aumentar a durabilidade e a facilidade de manuseio.

É interessante mencionar que, quanto maior for a diferença de temperatura entre os lados do material, maiores serão os benefícios que uma barreira radiante pode oferecer.

Além disso, as barreiras radiantes, que não fornecem uma quantidade significativa de isolamento térmico, podem ser combinadas com vários tipos de materiais de isolamento. Essas combinações são chamadas de sistemas de isolamento reflexivo.

Um sistema de barreira radiante é composto por um espaço aéreo com um ou mais dos seus limites agindo como uma barreira radiante. Uma barreira radiante é um material que restringe a transferência de radiação térmica, refletindo a radiação que o atinge e impedindo a irradiação do calor para outras superfícies.

A folha de alumínio é uma ótima barreira radiante. Embora seja um bom condutor de calor, é um material altamente reflexivo, fazendo com que a radiação térmica que incide sobre ela seja pouco absorvida. Então sendo colocada entre os materiais que estão tentando a transferência de calor por radiação (ao invés de condução) e se separado destes materiais por um espaço aéreo, a folha elimina efetivamente a troca de calor radiante normal em todo o espaço aéreo.

Desta maneira, o uso de materiais com essas características se faz necessário a fim de minimizar a troca de calor do meio externo com o meio interno, diminuindo consequentemente o consumo de energia do equipamento.

A resposta térmica dos materiais que dificultam a passagem de calor por radiação, ou seja, o seu desempenho como barreira radiante é determinada por três fatores: refletividade, emissividade e o ângulo de radiação incidente que atinge a superfície. Quanto mais um material reflete à radiação térmica, melhor essa superfície será, pois funcionará como uma barreira radiante.

Segundo PACHÊCO (1998), a emissividade é uma propriedade que indica a eficiência de uma superfície em emitir energia, quando comparada com um corpo negro à mesma temperatura e, em geral, a emissividade varia de acordo com a composição física e química das superfícies.

Já em relação aos materiais que dificultam a passagem do calor por condução, encontra-se a fibra de vidro, a lã de rocha, entre outros. Segundo MICHELS (2007), o bom desempenho destes materiais está relacionado com o valor da resistência térmica que eles apresentam. Quanto maior o valor da resistência térmica, menor será a facilidade à passagem do fluxo de calor.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo geral**

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a influência de isolantes térmicos refletivos em sistemas construídos com e sem a presença de vácuo, submetidos ambos a uma fonte de calor, verificando assim o comportamento térmico dos sistemas.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- ✓ Montar um sistema utilizando chapas de pequena espessura de aço inoxidável polido capaz de verificar a influência das propriedades radiativas no que diz respeito as perdas de calor do sistema.
- ✓ Verificar a influência do vácuo como forma de minimizar as perdas de calor no sistema.
- ✓ Analisar a redução na transferência de calor proporcionada pelo uso de superfícies refletivas, tendo como parâmetro um sistema utilizando a lã de vidro como isolante.
- ✓ Comparar a perdas de calor dos sistemas utilizando os três modelos de isolamento térmico.
- ✓ Verificar qual dos três modelos há uma menor perda de calor.

---

# **CAPÍTULO 2**

## **Revisão Bibliográfica**

---

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Conceitos de isolamento térmico**

Isolante térmico é um material ou estrutura que dificulta a dissipação de calor seja por condução ou por radiação térmica, já que estabelece uma barreira à passagem do calor entre dois meios que naturalmente tenderiam rapidamente a igualarem suas temperaturas. As principais características desses materiais são a sua alta resistência térmica, alta refletividade e baixa emissividade. O isolamento térmico é uma forma de conservação de energia bastante utilizado no mundo.

A finalidade de isolar termicamente é proteger as superfícies aquecidas, como a parede de um forno, ou resfriada como, como a parede de um refrigerador, através da aplicação de materiais de baixa condutividade térmica (NETO, 2009).

O melhor isolante térmico é o vácuo, mas devido à grande dificuldade para obter-se e manter condições de vácuo, é empregado em muito poucas ocasiões. Na prática se utiliza ar, que graças a sua baixa condutividade térmica e um baixo coeficiente de absorção da radiação, constitui um elemento muito resistente à passagem de calor. As moléculas do ar somente trocam calor por convecção e radiação.

A resistência térmica destes materiais deve-se principalmente a grande quantidade de ar presente entre as fibras ou confinado nas pequenas células formadas no processo de expansão das espumas e dos isolantes granulares. Algumas espumas podem conter ainda nos seus poros outros gases, com condutividade menor que a do ar, dificultando ainda mais a passagem do calor.

Dentre os produtos utilizados para isolar termicamente, existem os que dificultam a transferência do calor por condução (isolantes resistivos) e os que minimizam a passagem por radiação (isolantes refletivos ou barreiras radiantes).

### **2.2. Isolante resistivo**

O uso de isolantes que impedem o fluxo de calor por condução é o método mais antigo de conservação de energia. Existe no mercado atualmente, inúmeros materiais resistentes ao calor por condução. Um dos mais utilizados é a lã de vidro, por possuir ótimas propriedades

físicas e químicas e também por existir no mercado uma diversidade de densidades e espessuras, que adequam-se a cada necessidade, que o torna um dos mais tradicionais isolantes térmicos usados no mundo. (<http://www.metlica.com.br>).

O bom desempenho destes materiais está relacionado com o valor da resistência térmica que eles apresentam. Quanto maior o valor da resistência térmica, menor será a facilidade à passagem do fluxo de calor para o interior (DOE, 1991). A Tabela 2.1 mostra as propriedades térmicas dos principais isolantes resistivos.

Tabela 2.1. Propriedades térmicas dos principais isolantes resistivos.  
(<http://www.poliuretanos.com.br>).

Material	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Condutividade Térmica a 24 °C (W/mK)	Espessura necessária (mm)	Temperatura máxima de serviço (°C)
Espuma rígida de PU	32	0,017	20	104-121
Poliestireno expandido	16	0,035	44	74
Lã-de-vidro	65-160	0,037	49	343
Lã-de-rocha	100-300	0,046	46-51	649-1037
Cortiça	220	0,049	61	-
Madeira (pinho branco)	350-500	0,112	>140	-

### 2.2.1. Lã de vidro

A lã de vidro é um dos isolantes térmicos mais tradicionais e mais utilizados no mundo, por possuir ótimas propriedades físicas e químicas. Um dos setores que mais o utiliza é na construção civil, pois contribui bastante para a obtenção do conforto térmico e acústico tanto das edificações comerciais, como também residenciais. É também muito utilizada em fornos elétricos para evitar perdas de calor internamente. A figura 2.1 mostra através de um desenho ilustrativo, placas de lã de vidro.



Figura 2.1 - Placas de Lã de vidro

### 2.2.1.1. Características da lã de vidro

- É leve
- fácil de manusear e de cortar;
- São incombustíveis, evitando a propagação das chamas e o risco de incêndio;
- Reduz o consumo de energia de sistema de ar condicionado;
- Não ataca as superfícies com as quais estão em contato;
- Não favorece a proliferação de fungos ou bactérias;
- Não deteriora nem apodrece;
- Não tem o desempenho comprometido quando exposto à maresia;
- Sua capacidade isolante não diminui com o passar do tempo.

A grande diversidade de densidade, forma e espessura oferecidas pela lã de vidro, possibilita o atendimento das mais diferenciadas gamas de necessidades de isolamento na área industrial, combinando com o equilíbrio necessário entre o custo e o benefício.

### 2.3. Isolantes refletivos e barreiras radiantes.

O uso de isolamentos refletivos é um método de conservar energia conhecido por mais de 50 anos, instalado em residências, em galpões industriais e comerciais, hangares de aeroportos etc. As barreiras radiantes reduzem a transferência de calor através da baixa emissão e da alta reflexão da radiação incidente (DOE, 1991).

Essa maneira de reduzir a dissipação térmica pode ser encontrada utilizando materiais que tenham baixa emissividade, como os metálicos, emitindo pouco calor para fora do sistema

e refletindo a maior parte da radiação incidente para dentro do recipiente. Os materiais que desempenham esta função, geralmente são chamados de isolantes térmicos reflexivos ou de barreiras radiantes, pois dificultam a passagem do calor por radiação. Alguns autores diferem barreiras radiantes dos isolantes refletivos, embora alguns considerem o mesmo.

Segundo MICHELS (2007), as barreiras radiantes são mantas finas metálicas, normalmente cobertas de alumínio, portanto caracterizadas por possuir ao menos, uma superfície de baixa emissividade (aproximadamente 0,05) e são utilizadas para reduzir os ganhos térmicos por radiação entre as telhas e o forro (ou laje) de edificações: residencial, comercial e industrial, pois as mesmas ajudam a economizar energia elétrica, principalmente em ambientes climatizados; e para minimizar a perda de calor em sistema de aquecimento, conservando internamente o calor gerado, reduzindo também a necessidade de aumentar a potência térmica da fonte geradora de calor.

De acordo com VITTORINO (2003), as barreiras radiantes consistem de um material de baixa emissividade, posicionado no elemento construtivo de tal forma que esteja voltado para um “ambiente”, que pode ser o espaço ático, com ou sem ventilação, ou os recintos habitáveis como mostra a figura 2.2.



Figura 2.2. Vista da barreira radiante e o telhado.

Já os isolantes reflexivos são compostos por múltiplas e paralelas camadas de folhas finas ou lâminas de alta refletividade, que são espaçadas entre si de modo a refletir a energia radiante de volta à sua origem. O espaçamento entre essas folhas é projetado de modo a



restringir o movimento do ar e, em isolantes de alto desempenho, há presença de vácuo nesse espaço. Em todos os tipos de isolantes, vácuo nos espaços vazios implica na redução da condutividade térmica efetiva do sistema (INCROPERA, 2008).

Segundo VITTORINO (2003), isolantes refletivos são produtos que incorporam câmaras de ar não ventiladas, com dimensões e forma definidas, confinadas por pelo menos um material com baixa emissividade. São exemplos de isolantes refletivos os painéis metálicos ocos.

Os materiais mais utilizados neste processo são o alumínio e o aço inoxidável, ambos polidos. Assim, os isolantes térmicos diferem na maneira de reduzir o fluxo de calor.

Um fator bastante importante nessa forma de reduzir calor é que a superfície deve estar isenta de poeira, pois a presença de partículas da mesma na superfície faz com que sua eficiência seja reduzida.

MICHELS (2007) estudou a influência do acúmulo de poeira na diminuição da emissividade de uma superfície aluminizada em coberturas de edifícios. Verificou que a emissividade pode ser facilmente alterada devido o acúmulo de poeira sobre a superfície de barreira radiante. Durante o período de verão, quando o valor da emissividade foi 0,05, a passagem do fluxo de calor foi reduzido em 40% e ao se utilizar uma barreira radiante de emissividade igual a 0,30, a redução no fluxo de calor ficou abaixo de 20%, ou seja, com o acréscimo do valor da emissividade, ocorreu a maior passagem de calor para o ambiente interno da edificação.

Ainda segundo MICHELS (2007), o ângulo de inclinação de uma superfície que reflete à radiação em relação a radiação que está sendo incidida nesta, tem bastante influência no fluxo de calor. O autor verificou a variação de inclinação de telhados durante o inverno e observou que a redução do fluxo de calor pouco dependeu do ângulo da cobertura, cujo desempenho permaneceu em torno de 5%. Já durante o verão, quanto mais inclinado o telhado, menor a redução no fluxo de calor. Desta maneira foi possível concluir que a inclinação em que se encontra o telhado pode ter influência no desempenho térmico da barreira radiante. A figura 2.3 mostra uma radiação incidente em uma barreira de radiação de alumínio inserida numa subcobertura residencial.



Figura 2.3. Barreira de radiação térmica de alumínio. Fonte: ARMELIN (2004).

#### **2.4. Aplicações dos isolantes refletivos e barreira radiante**

A principal vantagem dos isolantes reflexivos são suas propriedades radiativas específicas e desejáveis. São inúmeras as aplicações para esse tipo de isolante, dentre os quais se destacam abaixo.

- Fachadas de edifícios residenciais e comerciais – São utilizados vidros refletivos que permitem refletir a radiação solar. Cada tipo de vidro tem um comportamento específico em relação à radiação solar e o efeito térmico das superfícies depende das propriedades espectrais dos vidros. Segundo HOLANDA (2007) os vidros reflexivos são caracterizados pela deposição de uma camada metálica em uma de suas faces. A Figura 2.4 mostra um edifício com uma fachada de vidro laminado refletivo prata.



Figura 2.4 - Edifício Spazio JK, São Paulo, SP.

- Fornos elétricos – São utilizadas superfícies de aço inox espelhado em fornos para tratamentos térmicos com finalidade de minimizar o fluxo de calor de dentro para fora diminuindo o consumo de energia elétrica. A Figura 2.5 mostra uma aplicação da superfície espelhada num forno para tratamentos térmicos.

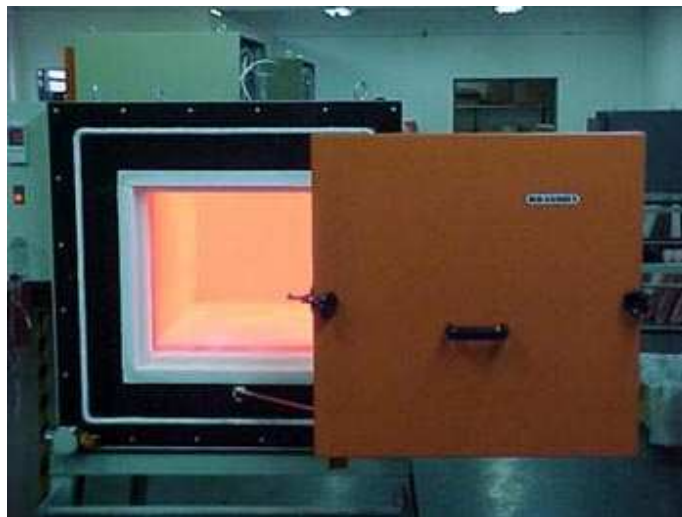


Figura 2.5 – Forno elétrico para tratamento térmico.

- Subcoberturas residenciais – Para evitar a transferência de calor do lado externo do ambiente para o interno devido a um gradiente de temperatura em que se encontra, é inserido entre a laje e o telhado barreira radiante capaz de bloquear a radiação, conservando o ambiente interno com temperatura amena.

VECCHIA (2001), investigou através de experimentos, o comportamento térmico de uma habitação unifamiliar ocupada e sem a aplicação do isolamento por reflexão, em condições normais de utilização, e num segundo momento a análise foi feita utilizando o PENTAK, Reflexfoil HD 2 que é uma lâmina metálica brilhante, tipo foil, que funciona como isolante térmico reflexivo aplicado entre o forro e o sistema de cobertura, composto por telhas cerâmicas. O Reflexfoil foi fixado sobre os caibros e abaixo das ripas, criando, dessa forma, duas pequenas câmaras de ar, logo acima e abaixo do painel de foil, como mostra a Figura 2.6.



Figura 2.6. Lâmina metálica brilhante, PENTAK, Reflexfoil HD 2.

Os ângulos de incidência dos raios solares, nessa época, se encontram mais próximos à normal do plano horizonte do observador, implicando em maior nível de absorção da radiação solar. O estudo foi feito ao longo de um período de 05 dias para cada momento, onde o equipamento utilizado nas medições constitui-se de um sistema automático de aquisição de dados.

As principais características termofísicas do Reflexfoil HD utilizadas encontra-se na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Especificações do ReflexFoil HD 2 – PENTAX

Refletividade	95%
Emissividade	0.03
Espessura	0.18mm

Dentre as conclusões mencionadas, a principal foi a de que houve uma redução na influência das trocas térmicas pelo sistema de cobertura, principalmente, em relação aos ganhos térmicos ao longo do período diurno. O período noturno que não apresentou problemas em relação ao conforto térmico manteve-se praticamente constante. Os valores das temperaturas internas do ar também foram reduzidos, após a colocação da lâmina. Essa subcobertura impôs uma redução na temperatura na ordem de 5.1 °C.

## 2.5. Perdas de calor em sistemas térmicos

A transferência de calor é um aspecto bastante dominante em praticamente todos os dispositivos de conservação e produção de energia. Sempre que ocorrer um gradiente de temperatura entre um meio ou entre meios diferentes, ocorre transferência de energia térmica do meio de maior temperatura para o meio de menor temperatura, até que atinja o equilíbrio térmico.

Segundo INCROPERA (2008), a transferência de calor é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço. Sendo assim, é importante salientar que esse calor que está sendo estudado é o calor sensível, ou seja, o calor ocasionado única e exclusivamente pela variação de temperatura do ambiente.

O calor é transferido dependendo das condições em que se encontra o meio através de dois tipos de regimes:

- Regime transiente
- Regime estacionário

### 2.5.1. Regime transiente

Segundo INCROPERA (2008), o regime transiente é aquele processo em que a temperatura em cada ponto do sistema é dependente do tempo. Isso acontece quando as condições de contorno térmicas desse sistema mudam como, por exemplo: velocidade do

vento, temperatura de superfície etc. Vale salientar que o regime transiente acontece quando pelo menos uma variável do processo se encontra ainda em mudança, não tendo por isso o sistema atingido o estado estacionário.

Apesar de grande parte dos problemas relacionados à transferência de calor ocorrer durante esse regime e devido às equações que regem o fluxo de calor nesse tipo de processo serem mais complexas, então, a análise poderá ser feita quando o sistema térmico entrar em regime estacionário, para que os cálculos sejam simplificados.

Segundo BRAGA, para um sistema atingir um regime permanente, deve existir sempre antes um regime transiente, ou seja, é preciso que exista um tempo, a partir do repouso, na duração do transiente, necessário para que as temperaturas tanto interna como externa se estabilizem, tornando o fluxo de calor constante.

### **2.5.2 – Regime estacionário**

Ao contrario do regime transiente, o regime estacionário é aquele estado em que a temperatura em qualquer ponto do sistema não varia em função do tempo, ou seja, à medida que o tempo passa, a diferença de temperatura do sistema permanecerá sempre a mesma.

Segundo PARK (1999), embora o regime transiente seja vantajoso no curto período de experimento e na precisão da determinação, os detalhes construtivos de equipamento experimental para o regime transiente são maiores e mais dispendiosos que os de um equipamento experimental em regime estacionário.

## **2.6. Mecanismos de transferência de calor**

A transferência de calor pode ser definida como a transferência de energia de uma região para outra, como resultado de uma diferença de temperatura entre elas.

É necessário o entendimento dos mecanismos físicos que permitem a transferência de calor de modo a poder quantificar a quantidade de energia transferida na unidade de tempo.

Existem três diferentes tipos de processos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Quando em um meio estacionário, que pode ser um sólido ou um fluido, existe um gradiente de temperatura, usa-se o termo condução para referir-se 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 os mesmos se encontram em temperaturas diferentes.

Já o terceiro modo de transferência de calor é conhecido por radiação térmica, que não necessita de um meio para se propagar, podendo ocorrer até mesmo no vácuo, fato esse que leva esse tipo de mecanismo ser de extrema importância, e no significado físico, talvez seja o mais interessante.

## 2.7. Transferência de calor combinada

Na maioria das situações práticas ocorrem ao mesmo tempo dois ou mais mecanismos de transferência de calor atuando ao mesmo tempo. Nos problemas da engenharia, quando um dos mecanismos domina quantitativamente, soluções aproximadas podem ser obtidas desprezando-se todos, exceto o mecanismo dominante. Deve ficar entendido que variações nas condições do problema podem fazer com que um mecanismo desprezado se torne importante.

A figura 2.7 mostra um esquema representativo dos modos combinados de transferência de calor que acontece na maioria dos sistemas térmicos.

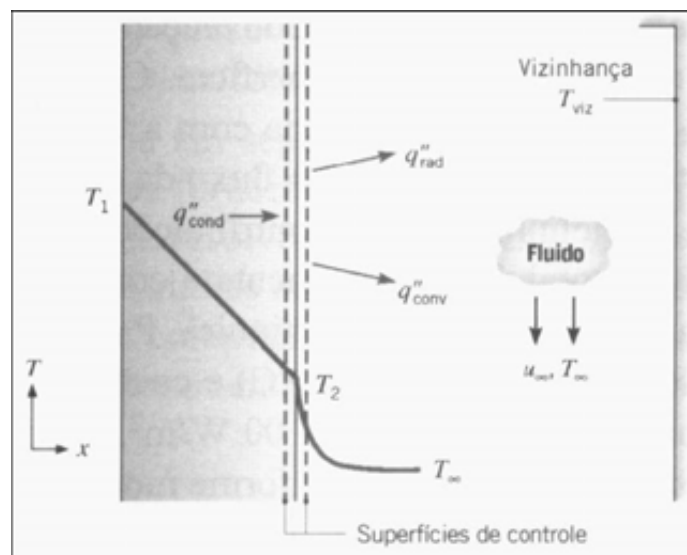


Figura 2.7. Esquema representativo dos modos combinados de transferência de calor (Incropera, DeWitt, 2008).

### 2.7.1. Transferência de calor por condução

A transferência de calor por condução “ $q_{\text{condução}}$ ” que ocorre através de um meio sólido, líquido ou gasoso pode ser calculado através da equação 2.1.

$$q_{1,2(\text{condução})} = \frac{K_{12} \cdot A \cdot (T_2 - T_1)}{L_{12}} \quad (2.1)$$

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

A capacidade das substâncias para conduzir calor (condutividade) varia consideravelmente. Por via de regra, os sólidos são melhores condutores de calor que os líquidos e estes são melhores condutores que gases. Num extremo, metais são excelentes condutores de calor e no outro extremo, o ar parado é um péssimo condutor de calor.

É importante ressaltar que quando a espessura é pequena comparado à área perpendicular ao fluxo, despreza-se as perdas laterais de calor (INCROPERA, 2008). A Tabela 2.3 mostra as propriedades térmicas de alguns metais.

Tabela 2.3. Propriedades térmicas dos metais – FONTE: [www.higher.com.br](http://www.higher.com.br)

Material	Densidade Kg/m <sup>3</sup>	Calor específico Kcal/ Kg °C	Condutividade térmica W/ m. K	Ponto de fusão °C
Aço Carbono	7850	0,12	66,18	1516
Aço Inoxidável 430	7610	0,11	22,06	1454
Aço Inoxidável (304, 316, 321)	8010	0,12	15,09	1399
Alumínio 1100	2707	0,24	220,6	643
Alumínio 2024	2771	0,24	193,91	502
Bronze (75% Cu, 25% Sn)	8667	0,082	25,54	1000
Cobre	8955	0,1	386,65	1083
Ouro	19272	0,03	292,6	1063



### 2.7.2. Transferência de calor por convecção

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 através da equação 2.2.

$$q_{1,\infty(\text{convecção})} = h_{2\infty} \cdot A \cdot (T_{\infty} - T_2) \quad (2.2)$$

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

O coeficiente convectivo “h” pode ser determinado através de equações empíricas encontradas na literatura. Para isso, dependendo do tipo de convecção, se natural ou forçada, e do tipo de geometria da superfície, existe uma equação específica para cada caso. Neste trabalho, são abordadas apenas as equações para o caso de convecção natural em placas planas verticais, pelo fato do experimento está relacionado com esse tipo de situação. O coeficiente de convecção “h” para este caso depende de algumas variáveis como mostra a equação 2.3 (Incropera, DeWitt, 2008).

$$h_c = 0,68 \text{Pr}^{\frac{1}{2}} \frac{Gr^{\frac{1}{4}}}{(0,952 + \text{Pr})^{\frac{1}{4}}} \frac{K}{L} \quad (2.3)$$

O número de Prandtl “Pr” é um número adimensional, cujo valor pode ser consultado através da tabela referente as propriedades térmicas do ar, na literatura. K é a condutividade térmica do ar, cuja unidade é W/m.K. O L é a altura da placa dada em “m”. O número de Grashof “Gr” é um número adimensional que fornece a relação entre a sustentação de um fluido em relação á viscosidade, onde a mesma pode ser escrita através da equação 2.4.

$$Gr = \left[ \frac{g\beta}{\nu^2} \right] (T - T_{\infty}) L^3 \quad (2.4)$$

onde  $g$  é gravidade dada em “m/s<sup>2</sup>”,  $\beta$  é o coeficiente de dilatação térmica do fluido, cuja unidade é “1/K”,  $\nu$  é a viscosidade em “m<sup>2</sup>/s”,  $T$  é a temperatura em “K” ou “ °C” e  $L$  a altura da chapa em “m”.

### 2.7.3. Transferência de calor por radiação

Segundo (NICOLAU & GUTHS, 1997) a energia não é transportada ponto a ponto no interior do meio, mas sim, através de uma troca direta entre as superfícies afastadas e a diferentes temperaturas.

A radiação térmica trata-se da energia emitida na forma de raios eletromagnéticos por qualquer corpo de temperatura acima de zero absoluto (ARMELIN & CHERRY, 2004).

A maior parte da radiação ocorre ao redor de um comprimento de onda específico, chamado de comprimento de onda especial de radiação, que depende da temperatura do corpo, pois, quanto maior é a temperatura, maior é a frequência da radiação, e menor é o comprimento de onda.

A transferência de calor por radiação “ $q_{\text{radiação}}$ ” que ocorre entre uma superfície e sua vizinhança é dada pela equação 2.5.

$$q_{2,\text{vizinhança (radiação)}} = \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_2^4 - T_{\text{vizinhança}}^4) \quad (2.5)$$

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 [m<sup>2</sup>], “ $T_2$ ” é a temperatura da superfície 2 [K], “ $T_{\text{vizinhança}}$ ” é a temperatura da vizinhança [K].

Analisando a Figura 2.7, e efetuando um balanço de energia na superfície de controle para o caso da análise sendo feito no regime permanente, obtêm-se a equação 2.6 e 2.7.

$$q_{1,2(\text{condução})} = q_{2,\infty(\text{convecção})} + q_{2,\text{vizinhança (radiação)}} \quad (2.6)$$

Ou ainda,

$$\frac{K_{12}(T_2 - T_1)}{L_{12}} = h_{2\infty}(T_\infty - T_2) + \varepsilon_2 \sigma (T_2^4 - T_{\text{vizinhança}}^4) \quad (2.7)$$

### 2.8. Cálculo para determinação da transferência de calor radiativa em sistemas com múltiplas superfícies refletivas.

Quando se deseja minimizar a transferência de calor radiativa líquida entre duas superfícies paralelas utilizam-se blindagens de radiação, ou simplesmente barreira radiante, que são construídas por materiais de baixa emissividade, ou seja, material que reflete bastante a radiação. A figura 2.8 mostra um esquema de montagem em que é utilizado uma barreira radiante, superfície 3, entre duas superfícies paralelas.

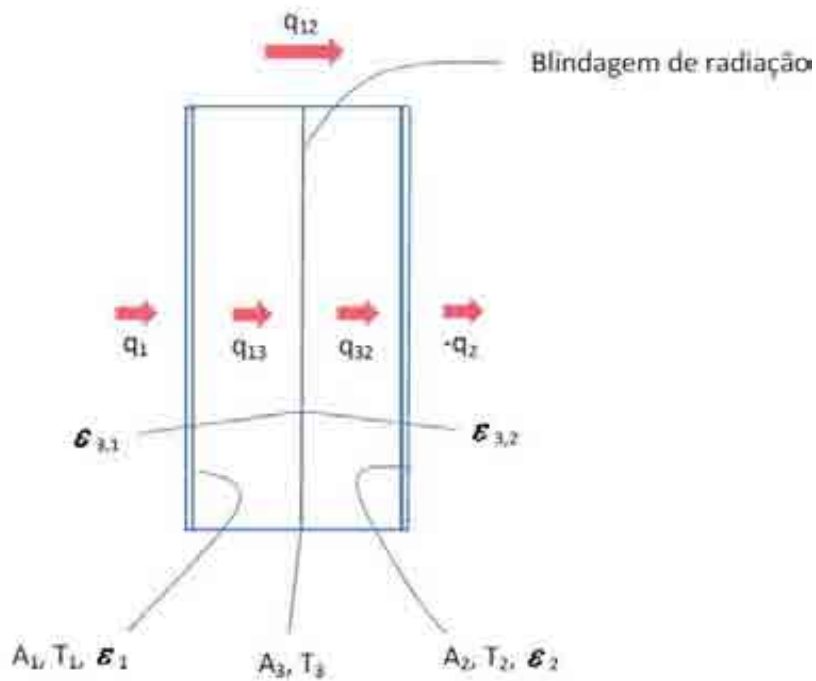


Figura 2.8. Esquema representativo da troca de radiação entre planos paralelos e barreira de radiação.

Sem a barreira de radiação introduzida no sistema, a taxa líquida da transferência de calor entre as superfícies 1 e 2 é dada pela equação 2.5.

Porém, com a barreira, aparecem resistências adicionais e a taxa de transferência de calor se reduz como pode ser verificado pela equação 2.8.

$$q_{12} = \frac{A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} + \frac{1 - \epsilon_{3,1}}{\epsilon_{3,1}} + \frac{1 - \epsilon_{3,2}}{\epsilon_{3,2}}} \quad (2.8)$$

Onde  $\epsilon_{3,1}$  é a emissividade que sai da superfície 3 na direção da superfície 1, e  $\epsilon_{3,2}$  é a emissividade que sai da superfície 3 em direção a superfície 2.

Percebe-se através da equação 2.8 que a emissividade associada a uma face da barreira ( $\epsilon_{3,1}$ ) pode ser diferente da associada a uma face oposta ( $\epsilon_{3,2}$ ), porém, as radiosidades, que é a soma da energia que está sendo emitida e a energia que está sendo refletida, serão sempre diferentes. Ainda pode ser observado que as resistências associadas à barreira de radiação são bastante grandes quando as emissividades  $\epsilon_{3,1}$  e  $\epsilon_{3,2}$  forem muito pequenas.

Vale salientar que o procedimento utilizado anteriormente pode ser ampliado para sistemas que envolvam múltiplas barreiras. No caso de todas as emissividades serem iguais, é possível mostrar através da equação 2.9 que com N barreiras radiantes,

$$(q_{12})_N = \frac{1}{N+1} (q_{12})_0 \quad (2.9)$$

## 2.9. Intensidade de radiação

A radiação térmica que é emitida por uma superfície se propaga em todas as direções possíveis, e de fato, interessa saber como essa radiação está distribuída de forma direcional. A radiação que incide sobre essa superfície também pode vir de diferentes direções, e a maneira pela qual a superfície responde a essa radiação depende da direção, portanto, a radiação emitida em todas as direções é definida em termos de intensidade.

A intensidade da radiação para qualquer comprimento de onda no que diz respeito a distribuição espectral varia dependendo da temperatura e da natureza da superfície que está sendo emitida a radiação. Como mostra a equação 2.10, 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 exposta à radiação projetada normal a direção  $\theta$  (PERIN, 2009).

$$I = \frac{dq}{dA_n dw \cos \theta} \quad (2.10)$$

onde  $dq/dA_r$  é a taxa de energia radiante, por unidade de tempo e por unidade, e por unidade de área superficial que passa dentro do ângulo sólido diferencial que esta sendo representado por  $dw$ , com uma inclinação formando um ângulo  $\theta$  com relação à normal da superfície que está emitindo calor. O ângulo sólido diferencial  $dw$  é medido pela razão entre o elemento com área  $dA_n$  sobre a esfera e o quadrado do seu raio como mostra a equação 2.11.

$$dw \equiv \frac{dA_n}{r^2} \quad (2.11)$$

A figura 2.9 mostra através de um desenho esquemático, a representação do ângulo sólido em um ponto sobre  $dA_1$  subtendido por  $dA_n$ , em um sistema de coordenadas esféricas

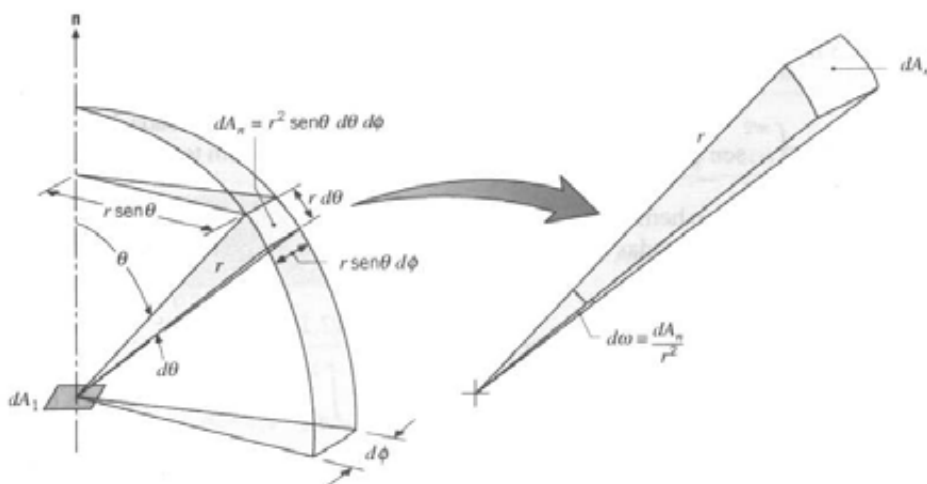


Figura 2.9. Ângulo sólido em um ponto sobre  $dA_1$  subtendido por  $dA_n$ , em um sistema de coordenadas esféricas (Incropera, DeWitt, 2008).

É de interesse agora definir a intensidade espectral  $I_{\lambda,e}$ , da radiação emitida. A intensidade espectral é definida pela taxa de energia radiante emitida com comprimento de onda  $\lambda$ , na direção  $(\phi, \theta)$ , por unidade de área da superfície que esta sendo emitida a radiação normal a essa direção, por unidade de ângulo sólido ao redor dessa direção, e por unidade de intervalo de comprimento de onda  $d\lambda$  no entorno de  $\lambda$ . Portanto a equação da intensidade espectral, que possui unidade de  $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$  pode ser escrita de acordo com a equação 2.12.

$$I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{dq}{dA_1 d\omega \cos \theta d\lambda} \quad (2.12)$$

Onde  $dq/d\lambda \equiv dq_\lambda$  é a taxa na qual a radiação de comprimento de onda  $\lambda$  deixa  $dA_1$  e passa através de  $dA_n$ .

### 2.10. Poder Emissivo

O poder emissivo de um corpo qualquer é o produto da emissividade de um corpo pelo poder emissivo de um corpo negro. O poder emissivo total  $E$ , ( $W/m^2$ ), corresponde à emissão espectral em todas as direções e comprimentos de onda possíveis.

O corpo negro emite a maior taxa de energia para um dado comprimento de onda e uma dada temperatura e é o padrão de comparação para todas as superfícies reais. Assim a taxa emitida em cada comprimento de onda, chamada de emitância ou poder emissivo espectral do corpo negro é dada pela Lei de Planck (Incropera e De Witt, 2003).

$$I_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (2.13)$$

Onde as constantes  $C_1 = h \cdot c^2 = 0,595537 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu m^4/m^2$ ,  $C_2 = h \cdot c/K = 14,387752 \mu m \cdot K$ , velocidade da luz no vácuo é de  $c = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$ , e  $T$  é a temperatura absoluta em  $K$ .

O poder emissivo de um corpo negro é dado pela expressão 2.14.

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.14)$$

Onde  $E_b$  é dado em  $W/m^2$ ,  $T$  é a temperatura da superfície em Kelvin [K] e a constante de boltzman,  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/m^2 K^2$ .

### 2.11. Radiosidade

A radiosidade é definida como o fluxo radiante que leva em consideração toda a energia radiante que deixa uma superfície, ou seja, a energia refletida mais a energia emitida sendo a mesma representada pela letra “J” que tem como unidade [ $W/m^2$ ]. A figura 2.10 mostra as parcelas de radiação refletida e emitida que a soma de ambas nos dará a radiosidade.

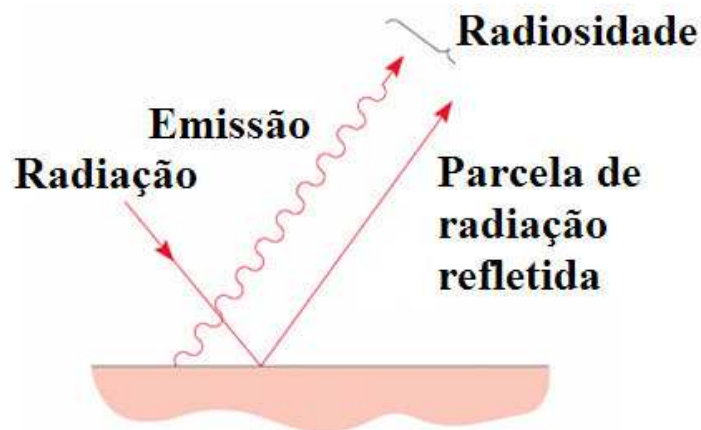


Figura 2.10. Radiosidade da superfície.

Vale salientar que, enquanto o fluxo radiante, neste caso a radiosidade, é baseado na área real da superfície, a intensidade de radiação é baseada na área projetada.

A radiosidade espectral,  $J_\lambda$  ( $W/m^2 \cdot \mu m$ ) representa a taxa de radiação de comprimento de onda  $\lambda$  que deixa uma área unitária da superfície, por unidade de intervalo de comprimento de onda  $d\lambda$  no entorno de  $\lambda$ , uma vez que leva em consideração a radiação que deixa a superfície em todas as direções, onde a mesma está relacionada com a intensidade associada à emissão e a reflexão,  $I_{\lambda, e+r}(\lambda, \theta, \phi)$ , pela expressão 2.15.

$$J_{\lambda}(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e+r}(\lambda, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.15)$$

Com isso, a radiosidade total,  $J$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) que está associado ao espectro total é representada pela expressão 2.16.

$$J = \int_0^{\infty} J_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (2.16)$$

## 2.12. Propriedades radiantes de superfícies

A nomenclatura que é utilizada para propriedades radiantes dos materiais varia de acordo com a literatura. No que diz respeito a essa nomenclatura uma questão que sempre ocorre é sobre o significado das terminações “sividade” e “tância”. Alguns autores utilizam a terminação “sividade” para materiais perfeitamente polidos, recozidos, sem tensões residuais, já a terminação “tância” é utilizada para superfícies rugosas e oxidadas. 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, absortividade, refletividade, transmissividade.

### 2.12.1. Emissividade

Emissividade é a habilidade de um objeto em emitir energia infravermelha. A energia emitida indica a temperatura de um objeto. Emissividade pode ser um valor de 0 (refletida por um espelho) até 1.0 (corpo negro). Muitos materiais orgânicos, revestidos ou superfícies oxidadas podem ter valores de emissividade próximos do 0.95. (<http://www.higher.com.br>).

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 e nas mesmas condições de temperatura, onde  $\epsilon$  representa a emissividade da superfície do material, como mostra a equação 2.17.



$$\varepsilon = \frac{\text{Energia emitida pela superfície real}}{\text{Energia emitida pelo corpo negro}} \quad (2.17)$$

Segundo INCROPERA (2008), a emissividade dos materiais é devida às suas características superficiais, uma vez que, na maioria dos materiais, a radiação emitida pelas moléculas do seu interior é absorvida pelas moléculas adjacentes, sendo que apenas a energia emitida pelas moléculas localizadas a até 1  $\mu\text{m}$  da superfície do material é que deixa efetivamente o corpo .

Na prática, estão a maioria dos materiais e superfícies “corpos cinzas” tendo uma emissividade ou fator de absorção menor que 1.0. Para propósitos práticos, pode ser assumido que um emissor pobre, normalmente é um absorvedor pobre. Por exemplo, alumínio polido tem uma emissividade de 0.04 e é um emissor muito pobre. É altamente refletivo e é difícil de aquecer com energia infravermelha. Se a superfície de alumínio é pintada com um esmalte, a sua emissividade aumenta a 0.85 - 0.91 e é facilmente aquecido com energia infravermelha.

A emissividade pode depender de alguns fatores como a temperatura do corpo, comprimento de onda da energia emitida, e o ângulo da emissão. Quando um corpo emite a mesma quantidade de energia que absorve, o mesmo se encontra em equilíbrio radiante. Se um corpo estiver ao mesmo tempo em equilíbrio radiante e possuir fonte de calor constante sua temperatura permanecerá constante.

A emissividade é frequentemente medida experimentalmente na direção normal da superfície, e como função do comprimento de onda. Por definição, a emissividade do corpo negro é igual a 1, pois ela absorve toda a radiação incidente independente do seu comprimento de onda e de sua direção. (INCROPERA, 2008).

Segundo PERIN (2009), 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. A Figura 2.11 mostra os parâmetros que afetam a emissividade dos materiais.

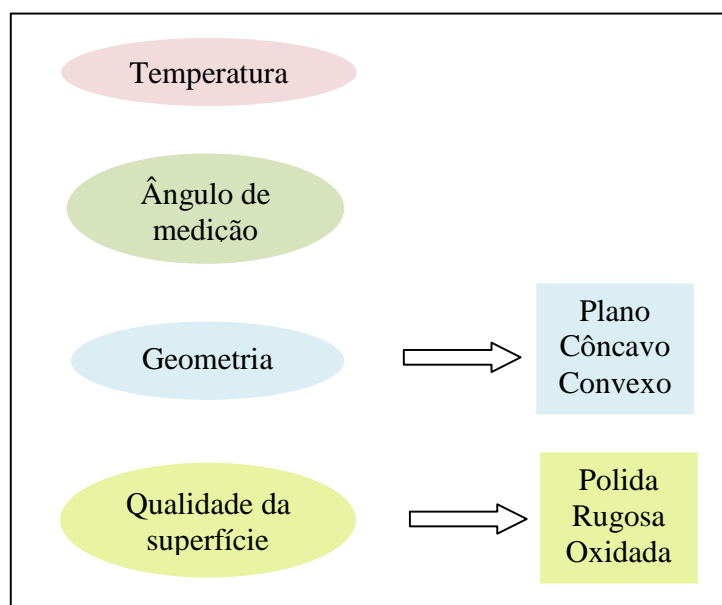


Figura 2.11. Parâmetros que afetam a emissividade-Fonte: HIGLER.

Os valores de emissividade mostrados na tabela 2.4 são aproximados, além do mais, esses valores representativos de emissividade apresentados na literatura podem não ser válidos para os materiais reais de interesse, pois a emissividade é fortemente dependente de alguns parâmetros como os apresentados no diagrama abaixo.

A tabela 2.4 serve como referência para a estimativa da emissividade e pode ser usada quando não for possível realizar nenhum dos métodos anteriores.

Tabela 2.4. Valores típicos da emissividade dos materiais - Fonte: HIGHER

Metal	Polido	Rugoso	Oxidado
Alumínio	0,04	0,055	0,11 - 0,019
Inox 304	0,17	0,57	0,85
Inox 430	0,17	0,57	0,85
Bronze	0,03	0,06 - 0,2	0,60
Cobre	0,018 - 0,02	—	0,57
Ouro	0,018 - 0,035	—	—
Aço	0,12 - 0,40	0,75	0,80 - 0,95
Inoxidável	0,11	0,57	0,80 - 0,95
Chumbo	0,057 - 0,075	0,28	0,63
Níquel	0,45 - 0,087	—	0,37 - 0,48
Prata	0,02 - 0,035	—	—
Estanho	0,04 - 0,065	—	—
Zinco	0,045 - 0,053	—	0,11

Deve ser reconhecido que a emissividade depende fortemente da natureza da superfície, que pode ser influenciada pelo método de fabricação e reações químicas com o ambiente, visto que a presença de camadas de óxidos pode aumentar de forma significativa a emissividade de superfícies metálicas.

### 2.12.2. 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  $\lambda$ . A irradiação total “ $G$ ” ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) engloba todas as contribuições espectrais, e pode ser calculada pela equação 2.18.

$$G = \int_0^{\infty} G_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (2.18)$$

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 2.12 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  $G_{\lambda, \text{ref}}$  e partes desta radiação podem ser transmitidas  $G_{\lambda, \text{tr}}$ .

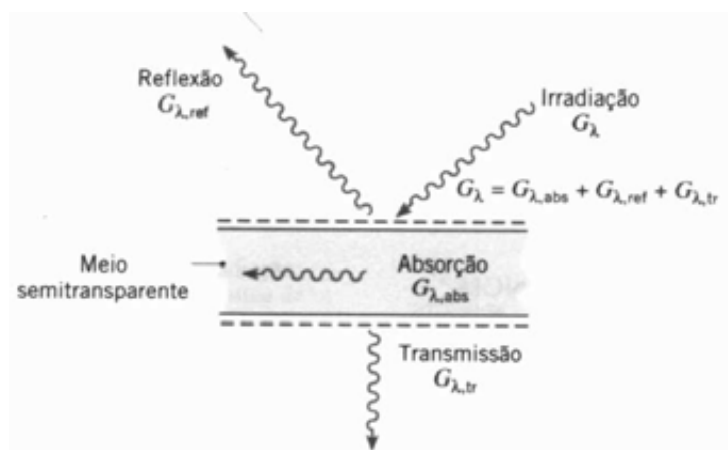


Figura 2.12. Processos de absorção, reflexão, e transmissão associados a um meio semitransparente (INCROPERA, 2008).

A partir de um balanço de radiação, obtêm-se a equação 2.19.

$$G_{\lambda} = G_{\lambda,abs} + G_{\lambda,ref} + G_{\lambda,tr} \quad (2.19)$$

Ou ainda, dividindo tudo pela irradiação  $G_{\lambda}$ , obtêm-se a equação 2.20.

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1 \quad (2.20)$$

onde  $\alpha$  é a absorvidade,  $\rho$  é a refletividade e  $\tau$  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.

### 2.12.3. Absortividade

A absorvidade é uma das propriedades radiantes que determina a fração da irradiação incidente na superfície que é absorvida por este corpo, como mostra a equação 2.21.

$$\text{Absortividade} \equiv \alpha = \frac{\text{Energia absorvida pelo corpo}}{\text{Energia incidente no corpo}} \quad (2.21)$$

Segundo MODEST (1993), A absorção da radiação térmica na superfície dos materiais é função da quantidade de elétrons livres presentes.

Nos materiais condutores de eletricidade como os metais, há uma grande quantidade de elétrons livres que fazem com que seja refletida grande parte da energia térmica incidente, resultando em pequena absorção, e portanto, pequena emissão de energia térmica. Nos materiais não condutores, há poucos elétrons livres e a absorção da energia térmica se dá em grande quantidade no reticulado estrutural do material. O estudo detalhado da interação entre a radiação térmica e a matéria é alvo da teoria eletromagnética e da física quântica (VITTORINO, 2003).

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. Essa propriedade pode ser caracterizada tanto por uma dependência direcional como por uma dependência espectral.

A absorptividade direcional espectral,  $\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi)$  de uma superfície é definida como a fração de intensidade espectral incidente na direção  $\theta$  e  $\phi$  que é absorvida pela superfície, como mostra a equação 2.22.

$$\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) \equiv \frac{I_{\lambda,i,abs}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad (2.22)$$

É interessante notar que nessa expressão, despreza-se qualquer dependência da absorptividade em relação à temperatura superficial, pois, segundo INCROPERA (2008), tal dependência é pequena para a maioria das propriedades radiantes espectrais.

Ainda segundo Incropera (2008), para a maioria dos cálculos de engenharia utiliza-se propriedades superficiais que representam médias direcionais. Conseqüentemente, define-se absorptividade hemisférica espectral  $\alpha_{\lambda}(\lambda)$  como a energia incidente que é absorvida por sua energia incidente, ambas por intervalo de comprimento de onda, como mostra a equação 2.23.

$$\alpha_{\lambda}(\lambda) \equiv \frac{G_{\lambda,abs}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad (2.23)$$

Portanto, através da equação pode-se notar que  $\alpha_{\lambda}$  depende da distribuição direcional da radiação incidente, do seu comprimento de onda e da natureza da superfície absorvedora.

Absorptividade 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, como mostra a equação 2.24 e 2.25.

$$\alpha(T) = \frac{G_{abs}}{G} \quad (2.24)$$

ou ainda

$$\alpha(T) \equiv \frac{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (2.25)$$

#### 2.12.4. Refletividade

A refletividade é uma propriedade que determina a fração de energia incidente na superfície de um corpo que é refletida por esse corpo, como mostra a equação 2.26.

$$\text{Refletividade} \equiv \rho = \frac{\text{Energia refletida pelo corpo}}{\text{Energia incidente no corpo}} \quad (2.26)$$

A refletividade do corpo negro é igual a 0, para todos os comprimentos de onda. Assim como na absorptividade, a refletividade é uma propriedade que pode ser caracterizada tanto por uma dependência direcional como por uma dependência espectral.

A refletividade direcional espectral,  $\rho_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi)$  de uma superfície é definida como a fração de intensidade espectral incidente na direção  $\theta$  e  $\phi$  que é refletida pela superfície, como mostra a equação 2.27.

$$\rho_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) \equiv \frac{I_{\lambda,i,ref}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad (2.27)$$

A refletividade hemisférica espectral  $\rho_{\lambda}(\lambda)$  é definida como a fração da irradiação espectral que é refletida pela superfície como mostra a equação 2.28.

$$\rho_{\lambda}(\lambda) \equiv \frac{G_{\lambda,ref}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad (2.28)$$

Refletividade hemisférica total  $\rho$ , é definida como fração da irradiação total refletida por uma superfície como mostra a equação 2.29 e 2.30. Representa a média total integrada sobre a direção e o comprimento de onda.

$$\rho(T) = \frac{G_{ref}}{G} \quad (2.29)$$

ou ainda

$$\rho(T) \equiv \frac{\int_0^{\infty} \rho_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (2.30)$$

De acordo com INCROPERA (2008), Dependendo da forma como a radiação é refletida, as superfícies podem ser idealizadas como difusas ou especulares. Pode-se observar através da figura 2.12, que a reflexão difusa ocorre se, independentemente da direção da radiação que incide na superfície, a intensidade da radiação refletida for independente do ângulo de reflexão. Já a reflexão especular ocorre se toda a reflexão for na direção de  $\theta_2$ , que equivale ao ângulo incidente  $\theta_1$ .

Por mais que nenhuma superfície seja perfeitamente especular ou difusa, a condição especular pode ser mais bem aproximada por superfícies polidas, como é o caso dos espelhos, enquanto que a condição difusa por superfícies rugosas. A figura 2.13 mostra um desenho esquemático das reflexões difusa e especular que acontecem em uma superfície.



Figura 2.13. Reflexões difusa e especular (INCROPERA, 2008).

### 2.12.5. Transmissividade

A transmissividade de materiais semitransparentes é definida como a fração da energia incidente que transpõe o material, como mostra a equação 2.31.

$$\text{Transmissividade} \equiv \tau = \frac{\text{Energia que utrapassa o corpo}}{\text{Energia incidente no corpo}} \quad (2.31)$$

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

A transmissividade hemisférica espectral  $\tau_\lambda(\lambda)$  é definida como a fração da irradiação espectral que é transmitida pela superfície. A equação 2.32 mostra essa fração.

$$\tau_\lambda(\lambda) \equiv \frac{G_{\lambda,trans}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)} \quad (2.32)$$

Transmissividade hemisférica total  $\tau$  é definida como fração da irradiação total transmitida através de um material semitransparente, como mostra a equação 2.33 e 2.34. Representa a média total integrada sobre a direção e o comprimento de onda.

$$\tau(T) = \frac{G_{trans}}{G} \quad (2.33)$$

Ou ainda,

$$\tau(T) \equiv \frac{\int_0^\infty \tau_\lambda(\lambda) G_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda(\lambda) d\lambda} \quad (2.34)$$



### 2.13. Superfícies opacas, semitransparentes e transparentes

Os materiais podem ser idealizados como opacos, semitransparentes ou transparentes, de acordo com a maneira pela qual eles transmitem a radiação através do meio. Um meio é considerado opaco quando a sua transmissividade for igual a zero. Já o mesmo é considerado semitransparente quando a sua transmissividade estiver na faixa de  $0 < \tau < 1$ . E um meio é considerado transparente quando sua transmissividade é igual a 1.

Para propriedades que são médias em todo o espectro, a equação para superfícies semitransparente fica de acordo com a equação 2.35.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.35)$$

No entanto, se a superfície for opaca, ou seja,  $\tau = 0$ , então, não há transmissão, e a absorção e reflexão são processos de superfície, uma vez que sua soma é igual a 1, como mostra a equação 2.36.

$$\alpha + \rho = 1 \quad (2.36)$$

Desta forma, pode ressaltar que o conhecimento de uma propriedade implica necessariamente na determinação da outra.

---

# **CAPÍTULO 3**

## **Materiais e Métodos**

---

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1. Materiais e procedimentos utilizados para a construção do sistema térmico experimental**

Para a construção do sistema foram utilizados três chapas de aço inox 430, polido de ambos os lados, com dimensões (30 x 30) cm e espessura 0,5mm (fornecidas pela Brasinox – Brasil Inoxidáveis S/A) com espaçamento de 2,5 cm entre ambas. As bases para apoio das chapas foram confeccionadas de madeira. A Figura 3.1 mostra o sistema montado com três chapas de aço inox 430 reflexivo apoiado em bases de madeira.



Figura 3.1. Chapas de aço inox 430 reflexivo montadas em bases de madeira.

Em seguida foi inserido em cada lado da superfície da chapa, um termopar do tipo K, para monitoração das temperaturas, contabilizando seis termopares. A fixação de cada sensor na superfície foi feita com o durepoxi, pelo fato desse tipo de cola ser de simples aplicação, secagem rápida e suportar altas temperaturas. Após ser feita toda a fixação dos termopares, a superfície foi limpa utilizando um polidor de metais para eliminar as manchas e poeiras depositadas ao longo da montagem, uma vez que essas variáveis diminuem a refletividade da superfície. A figura 3.2 mostra a fixação dos termopares nas chapas de aço inox 430.



Figura 3.2. Fixação dos termopares nas chapas de aço inox 430

A Figura 3.3 mostra um desenho esquemático da disposição dos termopares nas chapas de aço inox, como também a presença da fonte de calor introduzida no sistema.

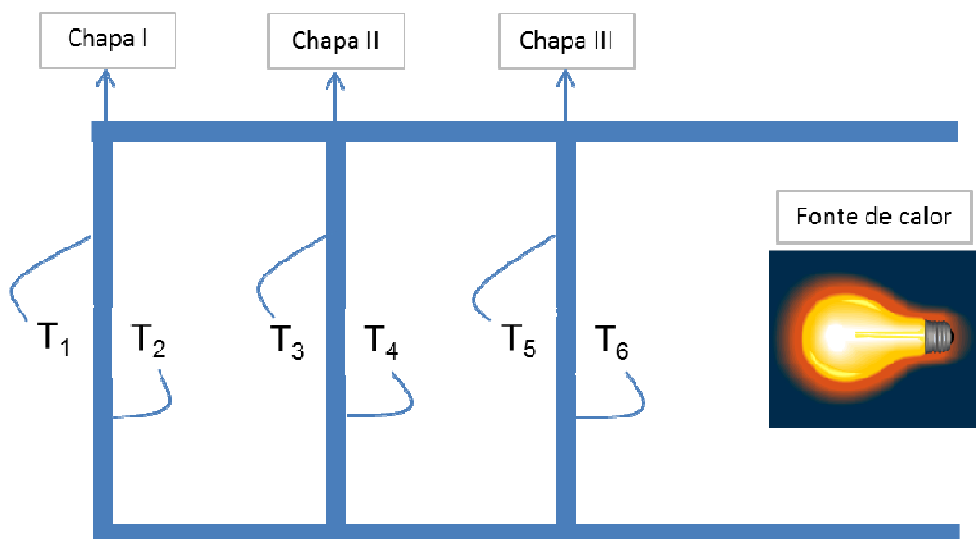


Figura 3.3. Desenho esquemático dos termopares nas superfícies das chapas.

Para o ensaio de análise do comportamento térmico do sistema construído de superfícies espelhadas foram utilizadas três configurações diferentes como forma de minimizar a transferência de calor para serem feitas possíveis comparações.

Foi utilizado como fonte de calor para ambas as configurações, um painel com 4 lâmpadas de 200W, sendo no total 800W de potência radiante, porém, devido a área de transferência de calor ser pequena e a superfície refletir parte da radiação incidente, a energia radiante efetiva que consegue entrar na chapa é 35W. A distância fixada entre a fonte de calor e a superfície 6 para ambas as configurações foi de 16 cm.

### **3.2. Montagem do sistema com barreira radiante com presença de ar.**

Na primeira configuração foi utilizado um sistema de três superfícies espelhadas sem a presença de vácuo. Para haver uma maior concentração de calor na superfície em contato com a fonte de calor, foram colocadas ao redor do sistema, quatro placas de EPS, como mostra a Figura 3.4.



Figura 3.4. Placas de EPS fixadas no sistema para concentração de calor da fonte geradora

Para a medição das temperaturas foram utilizados três termômetros digital de duas entradas, ambos com range (-50°C 750°C), sendo um de modelo MT-914 e dois de modelo MT-306. No termômetro I foram inseridos os termopares “1 e 2” (tipo K), no termômetro II foram inseridos os termopares “3 e 4”(tipo K), e por último, no termômetro III foram inseridos os termopares “5 e 6” (tipo K), como mostra a Figura 3.5.



Figura 3.5. Termopares conectados aos termômetros digitais

A Figura 3.6 mostra a disposição dos termopares fixados em cada lado da superfície da chapa de aço inoxidável 430 espelhado. Pode se perceber através da configuração dos termopares inseridos, que o fluxo de calor dará no sentido  $T_6$  a  $T_1$ .

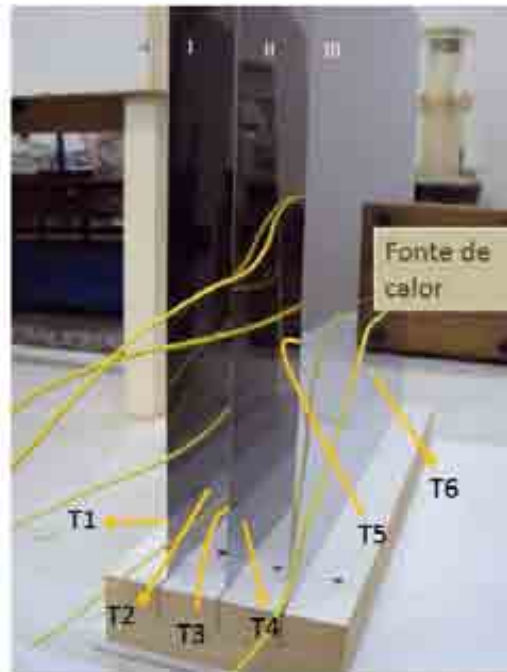


Figura 3.6. Fixação sequencial dos termopares nas superfícies das chapas de inox.

As temperaturas foram registradas e anotadas a cada 5 minutos, até o tempo em que o sistema entrasse em regime permanente. A temperatura ambiente local registrada foi de 25°C.

A Figura 3.7 mostra o ensaio da medição de temperatura do sistema com ar.



Figura 3.7. Ensaio da medição de temperatura do sistema com presença de ar.

### 3.3. Montagem do sistema com a presença de bomba de vácuo

Na segunda configuração foi utilizado um sistema de três superfícies espelhadas com a presença de vácuo. Para isso foi inserido durante o ensaio uma bomba de vácuo diafragma, modelo LSDVP – 050, fabricante LOGEN SCIENTIFIC, temperatura de trabalho (7°C ~ 40°C) e vácuo final até 0,08 MP. A Figura 3.8 mostra a bomba de vácuo utilizada no experimento.



Figura 3.8. Bomba de vácuo diafragma.

Para fazer vácuo no sistema térmico, foi feito um furo na parte superior do mesmo, de modo que pudesse introduzir a mangueira da bomba de vácuo para a retirada do ar contido internamente no recipiente.

Foi necessário deixar o sistema bem vedado, de modo a obter o máximo de vácuo possível, para isso, foi inserido nas superfícies das bases de madeira, nos encaixes da mangueira e no encaixe dos fios dos termopares, silicone e vedante de junta de motores de alta temperatura.

A pressão atingida no experimento após ter feito uma otimização no sistema, chegou a 0,06MP. Vale salientar que o vácuo foi feito através de um ensaio dinâmico.



A medição das temperaturas teve início após a bomba de vácuo retirar o máximo de ar dentro do recipiente, estabilizando assim a pressão de sucção. Depois de feito isso, foi ligada a fonte geradora de calor, onde a cada 5 minutos foram anotados os valores das temperaturas das superfícies, até todas as temperaturas se estabilizarem, entrando no regime permanente.

A Figura 3.9 mostra o ensaio de medição de temperatura realizado no sistema com presença de vácuo.

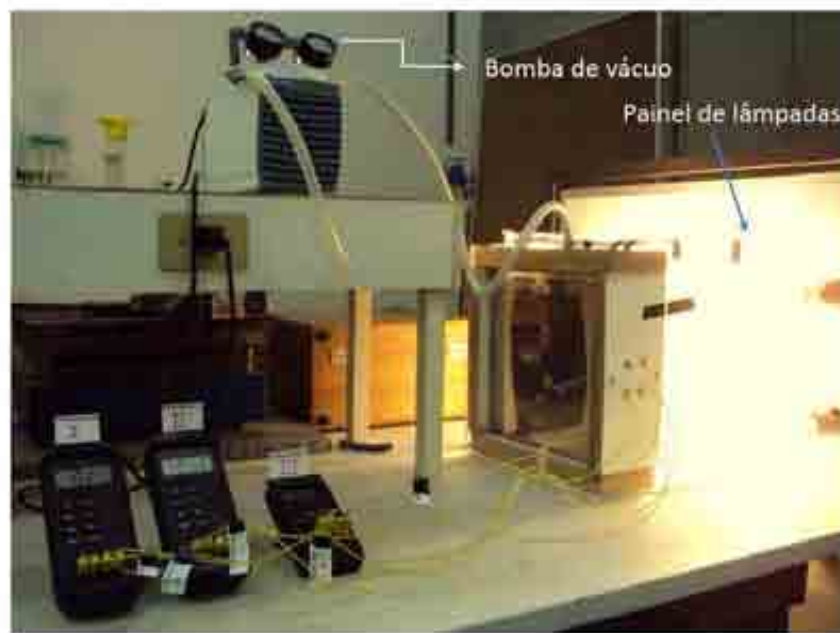


Figura 3.9. Ensaio da medição de temperatura com a presença de vácuo.

### 3.4. Montagem do sistema com a presença de lã de vidro

Na terceira configuração foi retirada a chapa central no sistema, na qual estavam inseridos os termopares 3 e 4 pertencentes ao termômetro II, e em seguida, todo o espaço vazio foi preenchido com duas mantas de lã de vidro, cada uma com espessura de 2,5 cm.

A Figura 3.10 mostra uma vista frontal do sistema com lã de vidro, onde as mantas foram colocadas de modo que pudessem ocupar todo o espaço do recipiente.



Figura 3.10. Manta de Lã de vidro introduzida entre as chapas.

Para a medição das temperaturas foi obedecida a mesma seqüência de posição dos termopares. As temperaturas foram registradas a cada 5 minutos, até o tempo em que as mesmas se estabilizassem, ou seja, até o sistema entrar em regime permanente, como em todas as situações anteriores.

A Figura 3.11 mostra o ensaio de medição de temperatura com presença de lã de vidro.



Figura 3.11. Ensaio da medição de temperatura com a presença de lã de vidro.

### 3.5. Determinação da refletividade da superfície da chapa de aço inox 430.

As medições de intensidade de radiação incidente e refletida para determinação da refletividade do material foi realizada utilizando um luxímetro (medidor de intensidade de luz), com Range de 0 a 300LX e 0 a 300KLX, fabricante PHYWE. Para encontrar a refletividade do aço inox 430 foi medida a intensidade de luz refletida e incidente.

Para a realização das medições de intensidade refletida foi utilizada como fonte de radiação térmica, uma lanterna de 5 LED. A lanterna ficou posicionada formando ângulos de 15°, 30°, 45° e 60°.

Foram feitas 4 medidas de intensidade refletida para cada ângulo de radiação incidente com relação a direção normal a chapa, uma vez que esse ângulo, influencia no valor da refletividade. É importante ressaltar que embora a chapa utilizada nesse experimento tenha uma superfície espelhada, não é considerada totalmente especular, pois seu ângulo de reflexão utilizada para medir a intensidade reflexiva não coincidiu com seu ângulo de incidência.

A Figura 3.12 mostra um esquema de medição da intensidade de luz refletida que foi utilizada na superfície do aço inox espelhado para determinação da refletividade do material.

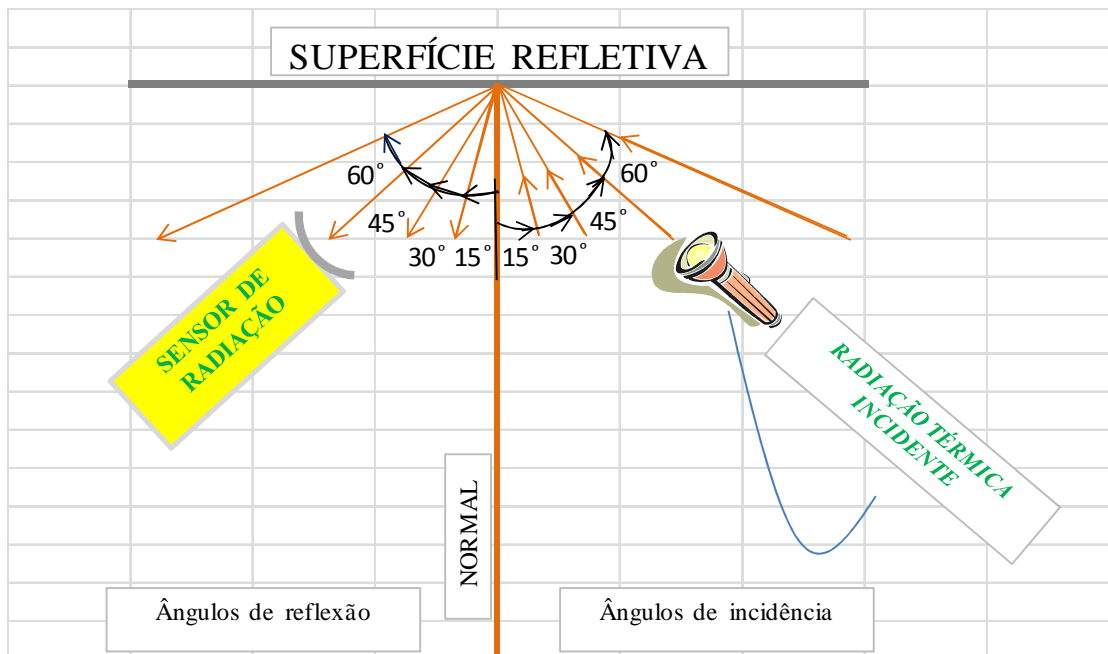


Figura 3.12. Desenho esquemático de medição da intensidade de radiação refletida.

A Figura 3.13 mostra como foi medida a intensidade de luz refletida na superfície do aço inox 430.



Figura 3.13. Medição de intensidade de luz refletida.

Para a determinação da intensidade de luz incidente foi utilizado o mesmo procedimento feito para obtenção da intensidade de luz refletida, porém, como a radiação de luz incidente que chega a superfície é a total, então a medição foi feita utilizando a fonte de radiação e o medidor frontalmente a uma distancia de 6 cm da chapa, uma vez que toda a radiação que chega ao sensor é registrado pelo instrumento, como é mostrado na figura 3.14.



Figura 3.14. Medição direta da intensidade de radiação.

A determinação da refletividade foi calculada utilizando a equação 3.2.

$$\rho = \frac{I_{refletida}}{I_{incidente}} \quad (3.2)$$

Onde  $\rho$  é a refletividade (adimensional),  $I_{refletida}$  é a intensidade refletida em Lux (Lx),  $I_{incidente}$  é a intensidade incidente em Lux (Lx).

### 3.6. Determinação da emissividade da chapa do aço inox 430

Para encontrar a emissividade do material foi utilizado um termômetro digital sem contato com mira laser e com contato termopar tipo K, modelo PM -1050, fabricante POLIMED, emissividade ajustável: 0,1 a 1, range sem contato (-20°C a 600°C) com resolução de 1°C e range com contato (-50°C a 1333°C) com resolução de 0,1°C para faixa de -50°C a 199°C e resolução de 1°C para faixa de 200°C a 1333°C.

Segundo a RoMiotto, a emissividade de qualquer objeto pode ser determinada através de um dos seguintes métodos abaixo. (<http://www.romiotto.com.br>).

- ✓ MÉTODO 1 - No primeiro método determina-se a temperatura atual do objeto usando um sensor como um RTD – Dispositivo de Resistência da Temperatura, termopar ou outro método apropriado. A seguir, usa-se o seu sensor portátil para medir a temperatura do objeto e ajustar a emissividade até que ela exiba a temperatura atual. Esta é a emissividade correta para o material medido.
- ✓ MÉTODO 2 - No segundo método a medição é feita para objetos com temperaturas relativamente baixas, até 260°C, onde se coloca um pedaço de fita isolante no objeto de modo que a fita seja suficientemente larga ao ponto de cobrir o diâmetro do spot de medição não deixando que o spot ultrapasse a extremidade da fita. A seguir, mede-se a temperatura da fita usando uma emissividade de 0,95. Finalmente, é medida a área adjacente ao objeto ajustando a emissividade até obter a mesma temperatura. Esta a emissividade correta para o material medido.

- ✓ MÉTODO 3 - O terceiro método aplica-se quando uma parte da superfície do objeto puder ser pintada utilizando tinta preta, onde em seguida é medida a área pintada usando uma emissividade de 0,93. Finalmente, mede-se a área adjacente ao objeto ajustando a emissividade até obter a mesma temperatura. Esta a emissividade correta para o material medido.

Para este trabalho a determinação da emissividade foi feita utilizando o primeiro método, sendo a medição feita à temperatura ambiente local. Vale salientar mais uma vez que a emissividade é uma propriedade que depende da temperatura a qual esteja submetido esse material, ou seja, quando mais alta a superfície estiver aquecida, mais energia emitida ela irá liberar para o meio ao seu redor.

A figura 3.15 mostra a medição da temperatura da superfície feita através do termômetro digital de contato tipo K. Essa temperatura encontrada será uma medida de referência que será utilizada para encontrar de forma indireta a emissividade do material, como foi posto em um dos métodos acima descrito.

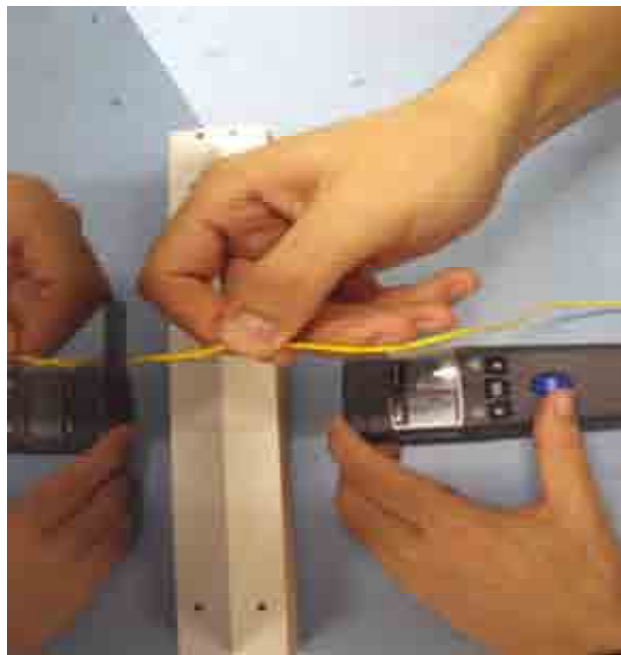


Figura 3.15. Medição de temperatura de contato da superfície.

Finalmente, para encontrar a emissividade à temperatura ambiente foi utilizado o termômetro digital com mira laser sem contato a uma distância de 10 cm, onde a emissividade foi sendo ajustada até a temperatura chegar a aquela dada pelo termômetro de contato.

A Figura 3.16 mostra como foi feita a medição de emissividade da superfície do aço inox 430.



Figura 3.16. Medição de emissividade da superfície.

A Figura 3.17 mostra o instrumento utilizado para a medição da emissividade do aço inox 430 refletivo.



Figura 3.17. Pirômetro ótico

---

# **CAPÍTULO 4**

## **Análise de Resultados**

---



## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1. Ensaio da medição de Emissividade do aço inox 430

Através da medição, a temperatura de referência encontrada no material por meio de um termômetro digital foi de 26,9 °C, temperatura essa que serviu de parâmetro para encontrar o valor aproximado da emissividade do material.

O Gráfico da Figura 4.1 mostra os valores das emissividades entre 0,1 e 0,2 que foi utilizada no instrumento para ajustar a temperatura que o mesmo fornecia com a temperatura que se encontrava o material, já que a emissividade depende da temperatura.

Das temperaturas, a que mais se aproximou da temperatura de referência medida foi a de 26 °C, o que permite afirmar que para essa temperatura, o valor aproximado da emissividade do aço inox 430 é de 0,18. Sendo assim esse valor de emissividade encontrado está aproximadamente igual ao valor médio encontrado na literatura (0,17).

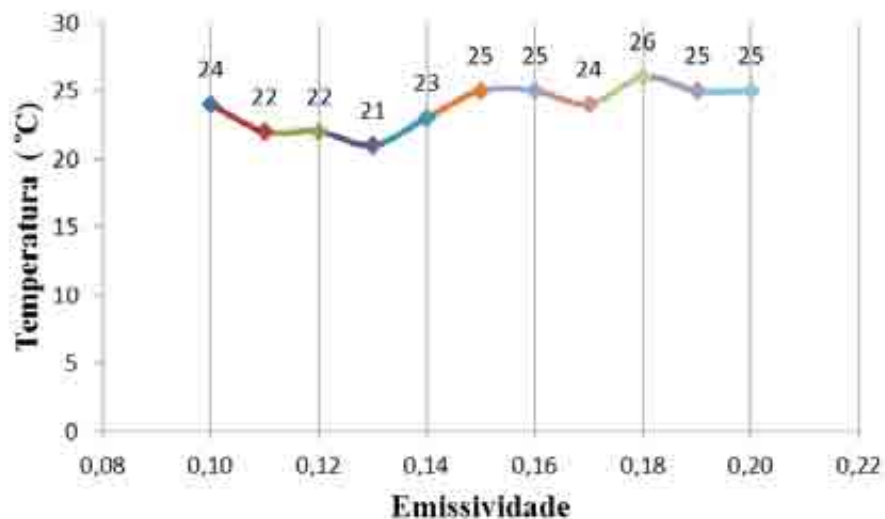


Figura 4.1. Gráfico de emissividade x temperatura do aço inox 430.

#### 4.2. Ensaio da medição de refletividade da superfície da chapa de aço inox 430

A intensidade radiativa direta, ou seja, a intensidade incidente na superfície da chapa medida através do sensor de radiação foi de 128 Lux, isto quer dizer que determinada região do material da chapa estava recebendo essa radiação diretamente, no entanto, os valores das intensidades que refletem em função do ângulo com relação a normal da chapa estão descritos na tabela 4.1.

Tabela 4.1. Valores de medição da refletividade da superfície da chapa de aço inox 430 em função do ângulo de incidência.

Ângulo de incidência (°)	Intensidade refletida (Lx)	Valores de refletividade (%)
15	52	40,6
30	50	39,06
45	49	38,3
60	46	35,93
	Média	38,47

Pode-se perceber na Tabela 4.1, que quanto menor o ângulo de radiação incidente na superfície da chapa do aço inox polido, isto com relação a normal, maior será a sua intensidade de radiação refletida, e conseqüentemente o valor de sua refletividade será maior, sendo esse efeito explicado pela física ótica.

Os raios têm uma maior dispersão quando os mesmos chegam inclinados devido a configuração geométrica dos próprios grãos. No caso do material utilizado neste experimento (o aço inoxidável 430), o valor da sua refletividade média encontrada foi de 38,47 %. Fazendo uma comparação entre os ângulos de radiação incidente extremos, 15° e 60°, utilizados no experimento, pode-se perceber que a refletividade da superfície para o ângulo de 15° foi de 4,67% a mais com relação à refletividade da superfície utilizando ângulo de incidência de 60°.

O Gráfico da Figura 4.2 mostra o comportamento da intensidade de radiação refletida com o ângulo de incidência, onde se percebe através da região entre o ângulo 30° e 45°, que a intensidade refletida em função do ângulo varia muito pouco. Após o ângulo de 45°, torna a se

comportar de forma normal, ou seja, a intensidade vai diminuindo de acordo com o aumento do ângulo, isso de forma proporcional.



Figura 4.2. Gráfico Intensidade refletida x Ângulo de incidência.

#### 4.3. Ensaio da medição de temperatura no sistema com barreira radiante sem vácuo

A Figura 4.3 servirá como identificação de posição dos termopares para análise dos gráficos de ensaio de medição de temperatura de cada modo de isolamento plotados adiante.

É importante ressaltar através desta figura, que o termopar 6 se encontra fixado na superfície voltada para a fonte de calor, a qual deve possuir uma maior temperatura com relação às demais, enquanto que o termopar 1, o qual se encontra na superfície oposta a da fonte de calor, deve possuir a menor, pois além de estar num ponto mais afastado da fonte de calor, está em contato com o ambiente.



Figura 4.3. Posição dos termopares nas superfícies da chapa de aço inox.

A Tabela 4.2 mostra as temperaturas das superfícies internas das chapas quando o sistema entra em regime permanente.

Para este sistema de isolamento, as temperaturas se estabilizaram num tempo aproximado de 85 minutos. A diferença de temperatura no regime permanente entre as superfícies (2 e 3), (4 e 5) foi respectivamente 37 °C, 31 °C.

Tabela 4.2. Temperaturas das superfícies no sistema de barreira radiante **sem vácuo** no regime permanente.

Superfícies	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>
Temperaturas	54°C	91°C	97°C	128°C
	ΔT = 37°C		ΔT = 31°C	

A Figura 4.4 mostra um desenho esquemático do sistema com barreira radiante sem vácuo e com os valores das temperaturas das superfícies em cada chapa.

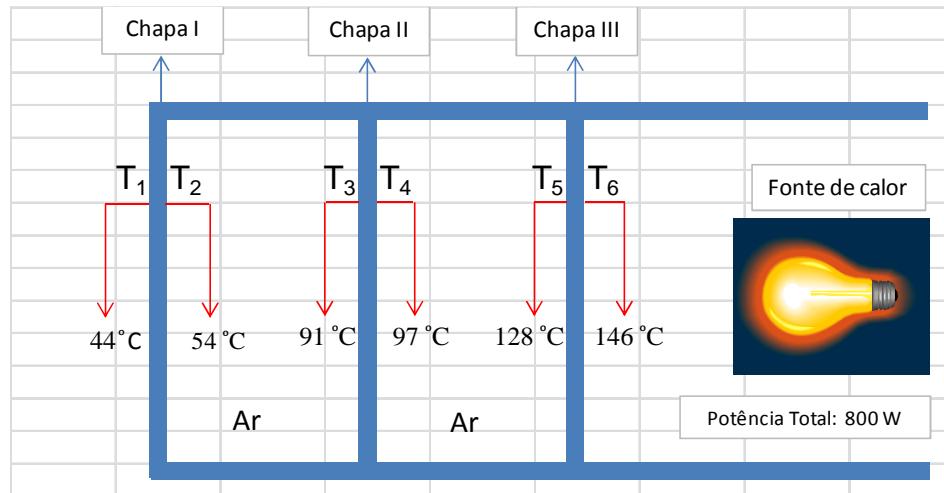


Figura 4.4. Desenho esquemático do sistema com barreira radiante sem vácuo e dos valores das temperaturas das superfícies em cada chapa.

Analisando-se a diferença de temperatura com o tempo, dos gráficos da Figura 4.5 e 4.7, superfícies (1 e 2) e (5 e 6), percebe-se que o comportamento de ambos são idênticos, ou seja, a medida que o tempo passa o  $\Delta T$  vai aumentando até o tempo em que se torna constante, enquanto que o  $\Delta T$  com relação ao tempo, entre as superfícies (3 e 4), é praticamente constante durante toda a medição, isso pelo fato da chapa II, a qual está contida a superfície (3 e 4), não está próximo nem da fonte de calor nem do sorvedouro (meio), ou seja, um meio inativo ao sistema.

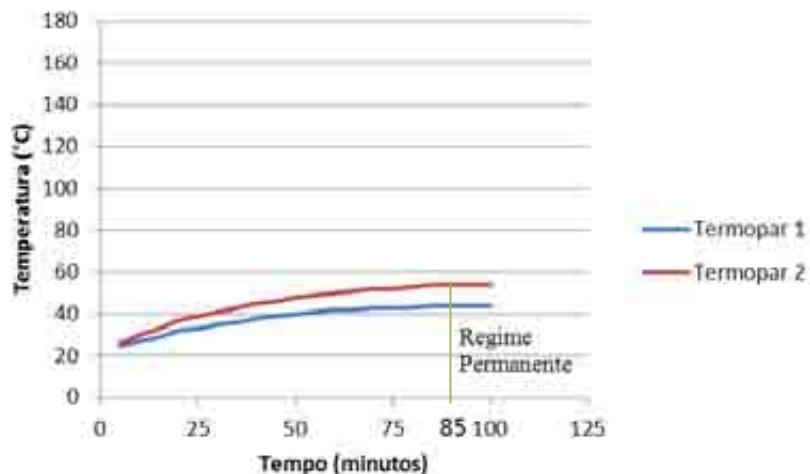


Figura 4.5. Gráfico (Temperatura x Tempo) – Termômetro I - Sistema com barreira radiante sem vácuo.

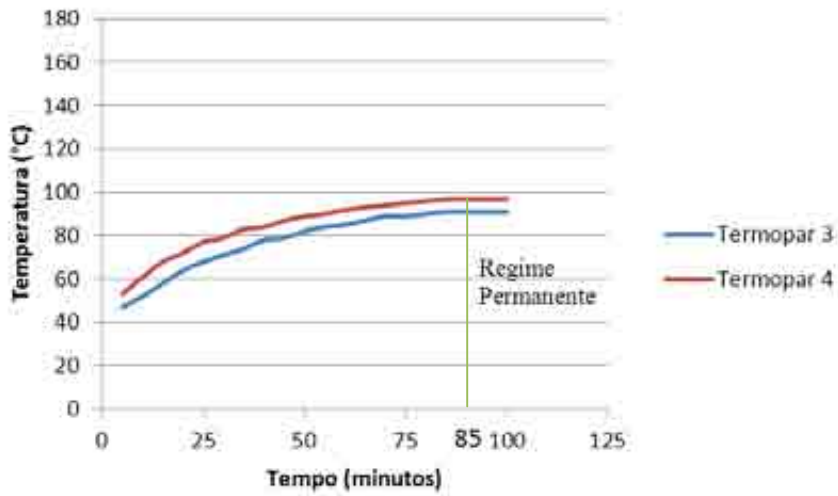


Figura 4.6. Gráfico (Temperatura x Tempo) – Termômetro II - Sistema com barreira radiante sem vácuo.

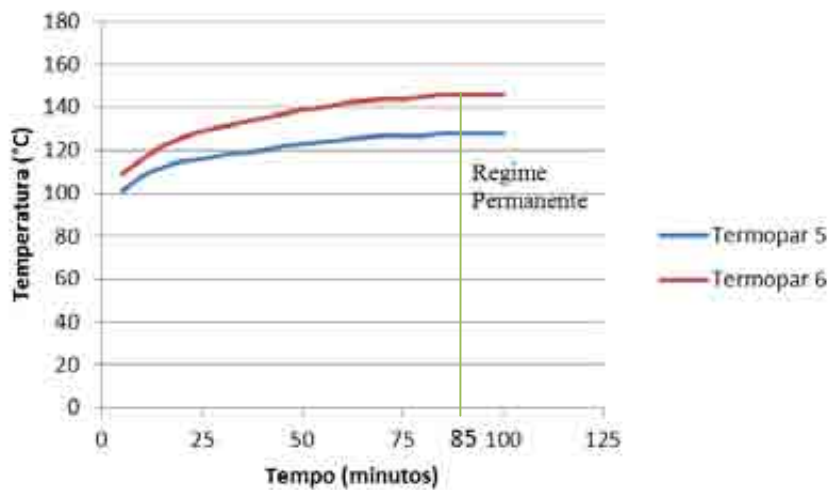


Figura 4.7. Gráfico (Temperatura x Tempo) – Termômetro III - Sistema com barreira radiante sem vácuo.

#### 4.4. Ensaio da medição de temperatura no sistema com barreira radiante e vácuo

A Tabela 4.3 mostra as temperaturas das superfícies internas das chapas quando o sistema entra em regime permanente.

Para este sistema de isolamento, as temperaturas se estabilizaram num tempo aproximado de 75 minutos. A diferença de temperatura no regime permanente entre as superfícies (2 e 3) e (4 e 5) foi respectivamente 25 °C, 36 °C.

Tabela 4.3. Temperaturas das superfícies no sistema de barreira radiante com vácuo no regime permanente.

Superfícies	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>
Temperaturas	49°C	74°C	81°C	117°C
	$\Delta T = 25^\circ\text{C}$		$\Delta T = 36^\circ\text{C}$	

A Figura 4.8 mostra um desenho esquemático do sistema com barreira radiante com vácuo e com os valores das temperaturas das superfícies em cada chapa.

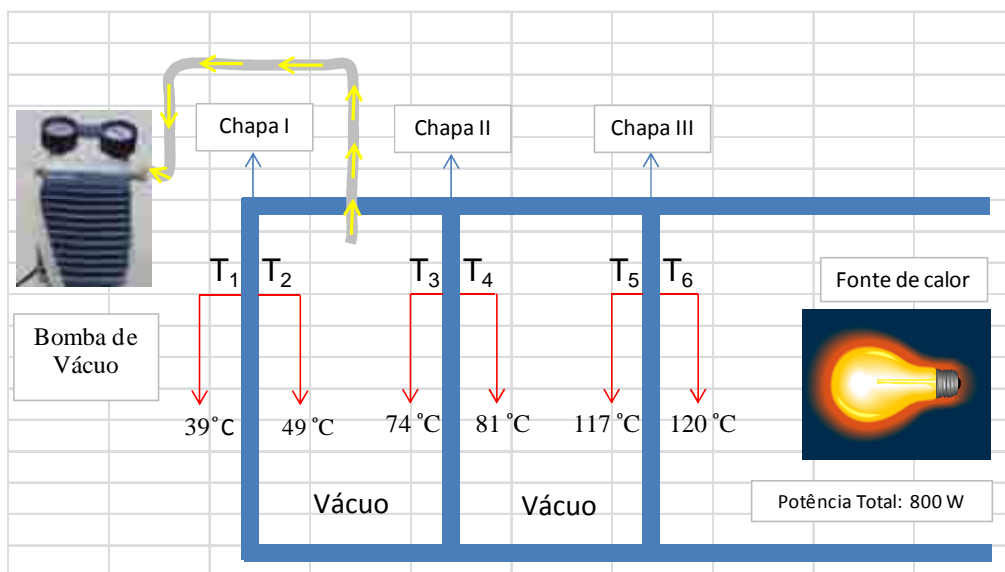


Figura 4.8. Desenho esquemático do sistema com barreira radiante com vácuo e dos valores das temperaturas das superfícies em cada chapa.

Analisando a diferença de temperatura com o tempo entre as superfícies (1 e 2), (3 e 4) e (5 e 6), nos Gráficos das Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 respectivamente, pode se perceber que o único que teve uma diferença de temperatura crescente em função do tempo foi o da figura 4.9, superfícies (1 e 2)

O comportamento dos Gráficos da Figura 4.10 e 4.11 tem diferença de temperatura ao longo do tempo constante, com uma única diferença, o gráfico da Figura 4.10 apresentou no tempo de aproximadamente 20 minutos de experimento, um decaimento brusco das temperaturas nas superfícies 3 e 4. Isso pode ter sido ocorrido pelo fato de nesse instante, o sistema ter apresentado algum vazamento na vedação, devido a pressões e temperaturas altas

agindo na mesma, fazendo com que a bomba de vácuo diminuísse a pressão de sucção na entrada do sistema.

O tempo de estabilização das temperaturas nas superfícies 5 e 6, aconteceu em um tempo menor (65 minutos), que nas superfícies 1, 2 e 3 e 4, (75 minutos). Diferentemente no caso do sistema de barreira radiante sem vácuo, que o tempo de estabilização referente às temperaturas nas superfícies se deu aproximadamente no mesmo tempo.

No Gráfico da Figura 4.9 pode-se perceber que  $T_2$  para este caso é menor que o  $T_2$  para o caso sem vácuo, anteriormente mostrado, porque chega menos energia nesta face, devido a ausência parcial da parcela convectiva, que no caso com presença de ar, essa parcela é existente.

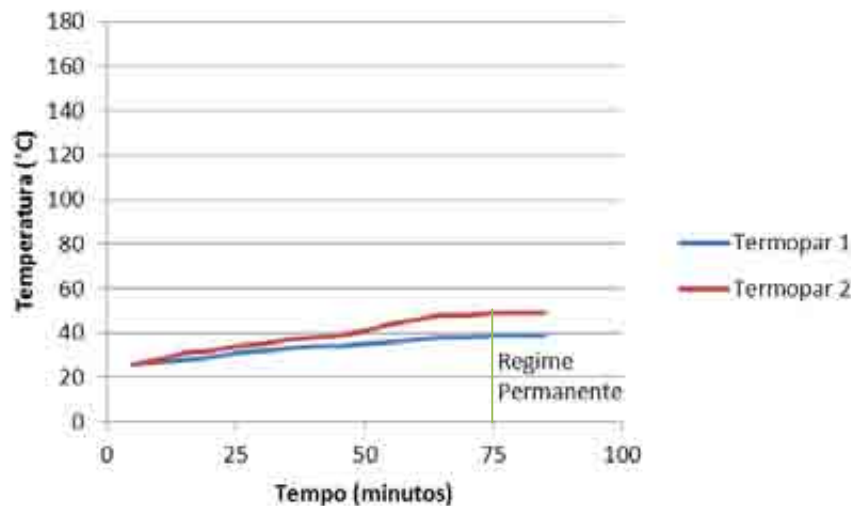


Figura 4.9. Gráfico (Temperatura x Tempo) – Termômetro I - Sistema com barreira radiante e vácuo.

Analisando as superfícies 3 e 4 no gráfico referente à figura 4.10, verificou-se que a diferença de temperatura foi praticamente constante durante toda a medição, pelo fato de não está próximo nem da fonte de calor nem do sorvedouro (meio), como foi descrito também para o caso anterior.



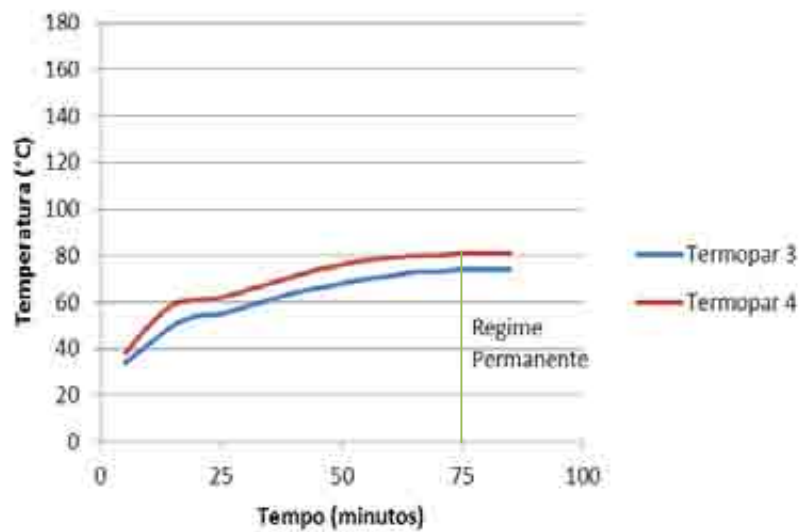


Figura 4.10. Gráfico (Temperatura x Tempo) – Termômetro II - Sistema com barreira radiante e vácuo.

Aqui  $T_4$  também é menor que o  $T_4$  para o sistema sem vácuo, pois chega menos energia térmica na superfície 4 devido o fluxo de calor se propagar entre as superfícies 4 e 5 apenas por radiação. Já, tanto  $T_3$  como  $T_5$  para este sistema, foi menor que  $T_3$  e  $T_5$  sem vácuo, porque neste sistema não existe armazenamento de calor (menor inércia térmica), já no caso sem vácuo sim.

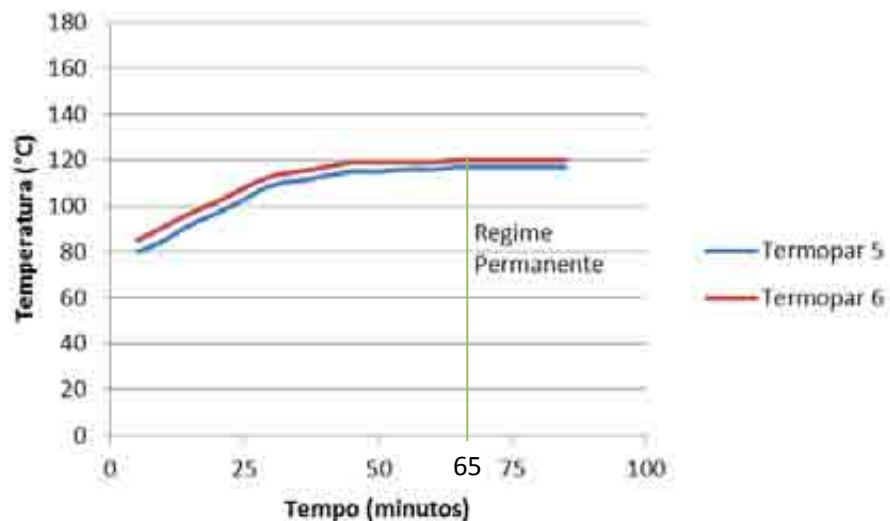


Figura 4.11. Gráfico (Temperatura x Tempo) – Termômetro III - Sistema com barreira radiante e vácuo.

#### 4.5. Ensaio da medição de temperatura no sistema com a utilização de lã de vidro

A diferença de temperatura no regime permanente entre as superfícies (2 e 5) foi de aproximadamente 81 °C, como pode ser visto na Tabela 4.4.

Tabela 4.4. Temperaturas das superfícies no sistema com lã de vidro no regime permanente.

Superfícies	T <sub>2</sub>	T <sub>5</sub>
Temperaturas	54°C	135°C
	ΔT= 81°C	

A Figura 4.4 mostra um desenho esquemático do sistema com lã de vidro e com os valores das temperaturas das superfícies em cada chapa.

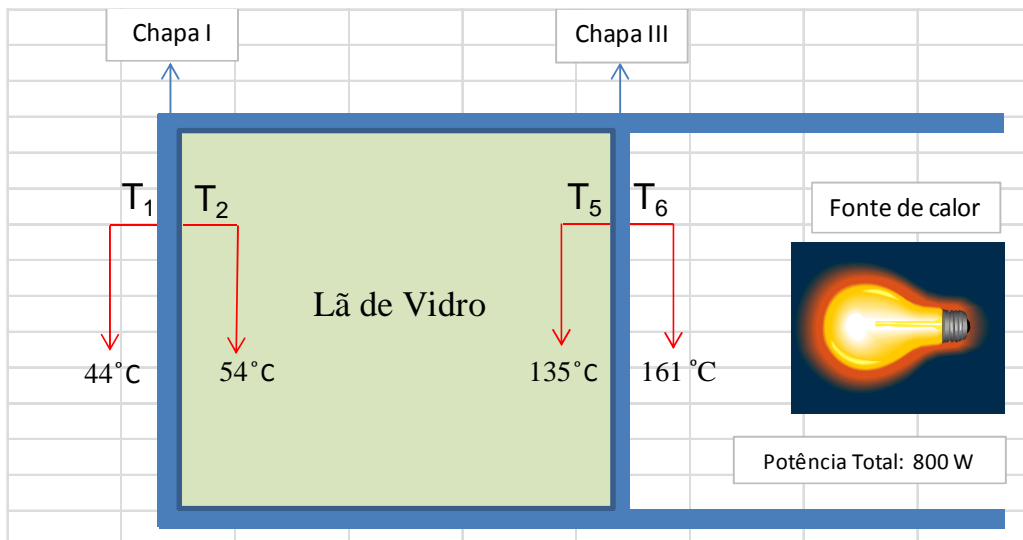


Figura 4.12. Desenho esquemático do sistema com lã de vidro e dos valores das temperaturas das superfícies em cada chapa.

Analisando os gráficos das Figuras 4.13 e 4.14, percebe-se que a diferença de temperatura nos 5 primeiros minutos de medição entre as superfícies (1 e 2) que é de 1 °C foi muito menor que a diferença de temperatura nos 5 primeiros minutos entre as superfícies (5 e 6) que é de 12 °C, pois, no sistema constituído de três barreiras condutivas, a transferência de calor por condução demorou mais tempo para atravessar todas as barreiras condutivas e chegar até a superfície 2, fazendo com que nos primeiros instantes, o T<sub>2</sub> estivesse praticamente à mesma temperatura que o T<sub>1</sub> em contato com o meio, tornando o ΔT muito pequeno.

Pode-se observar também, através dos Gráficos das Figuras 4.13 e 4.14, que a chapa a qual esta constituída os termopares 5 e 6 chega a ao regime permanente num tempo menor (50 minutos) que a chapa a qual esta constituída os termopares 1 e 2 (55 minutos), isto por que na condução, que é o modo predominante aqui, a transferência de calor se manifesta de forma mais lenta, fazendo com que a superfície 2 demore mais tempo para receber energia devido não só a resistência térmica da lã de vidro, mas também a sua espessura.

Percebeu-se também que o comportamento das temperaturas superficiais para este caso com lã de vidro, se aproximou das temperaturas para o caso do isolamento de barreira radiante com ar, sendo que para este, a barreira radiante auxiliou na minimização no fluxo de calor.

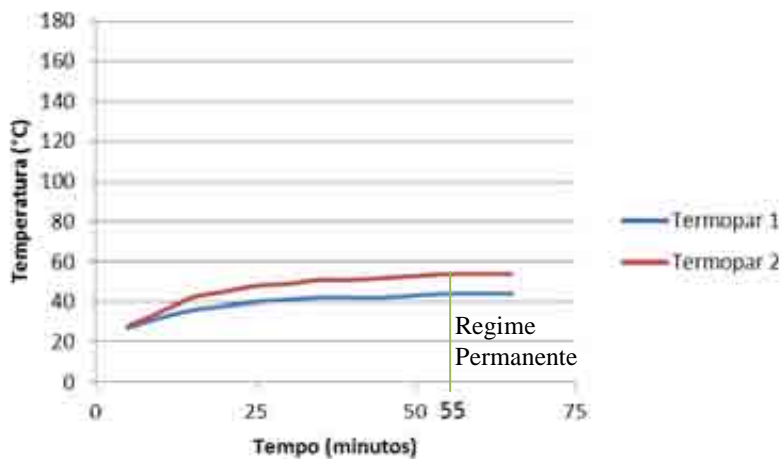


Figura 4.13. Gráfico (Temperatura x Tempo) – Termômetro I - Sistema com a utilização de lã de vidro.

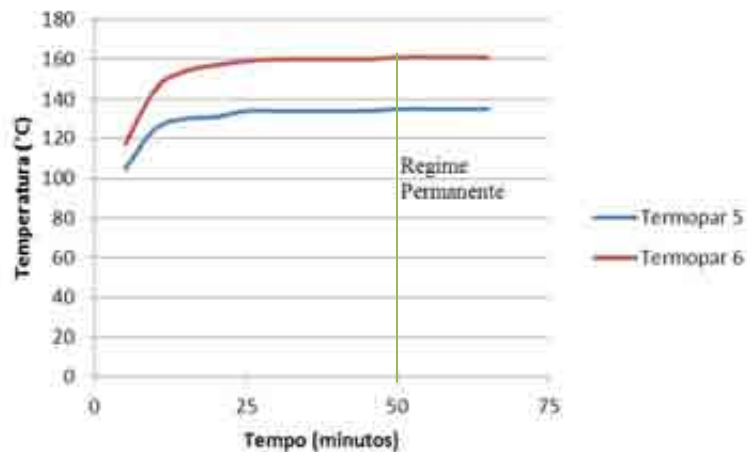


Figura 4.14. Gráfico (Temperatura x Tempo) – Termômetro III - Sistema com a utilização de lã de vidro.

#### 4.6. Comparativo do tempo de estabilização das temperaturas nas três configurações de isolamento.

A tabela 4.5 mostra o tempo em que cada modo de isolamento entra em regime permanente, tempo esse em que todas as temperaturas se estabilizam, tornando o fluxo de calor constante.

Tabela 4.5. Tempo de estabilização das temperaturas de cada modo de isolamento.

Modo de isolamento	Tempo de estabilização das temperaturas (minutos)
Lã de vidro	55
Barreira radiante com vácuo	75
Barreira radiante com ar	85

O sistema que apresentou menor tempo para atingir o regime permanente foi o do isolamento feito com lã de vidro, em seguida, o construído com barreira radiante com vácuo e por ultimo, o construído com barreira radiante com ar.

#### 4.7. Comparativo da variação de temperatura no regime permanente das superfícies externas 1 e 6 de cada modo de isolamento.

Analisando a tabela 4.6, verificou-se que o sistema de isolamento utilizando lã de vidro conseguiu obter em regime permanente uma variação de temperatura de 116 °C, enquanto que o isolamento utilizando barreira radiante com ar sofreu uma variação apenas de 102 °C, havendo, portanto, 12% de perda de temperatura a mais no sistema construído de lã de vidro com relação ao sistema com barreira radiante.

Fazendo agora uma comparação do isolamento com lã de vidro, cuja variação de temperatura foi de 116 °C, com o isolamento de barreira radiante com vácuo, cuja variação foi de 81°C, percebe-se que o isolamento com lã conseguiu perder 30% de temperatura a mais que o sistema construído com barreira radiante com vácuo.

Tabela 4.6. Comparativo da diferença de temperatura máxima do sistema em cada modo de isolamento.

Modo de isolamento	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>6</sub> (°C)	Varição de Temperatura Total (°C)
Isolamento com lã de vidro	45	161	116
Isolamento com uma barreira radiante	44	146	102
Isolamento com uma barreira radiante c/ presença de vácuo	39	120	81

Dentre os modos de isolamentos analisados, percebe-se que o que obteve uma maior perda de temperatura no regime permanente foi o sistema construído de lã de vidro.

#### 4.8. Comparativo das perdas de calor dos três modos de isolamento do sistema térmico experimental

Através da tabela 4.3 abaixo, pode-se observar através dos valores encontrados, que para as mesmas condições de medição, o sistema o qual foi utilizado como isolante, a lã de vidro, tem uma perda de energia maior (6,31W) que o sistema o qual foi construído utilizando como isolante uma barreira radiante (5,53W), e este, por sua vez, tem uma perda de calor maior que o mesmo sistema de barreira radiante, porém com vácuo, cuja perda foi considerada a menor (2,52W), uma vez que a ausência de ar entre as chapas elimina a parcela de fluxo convectivo, diminuindo o fluxo de calor total.

Tabela 4.7. Comparativo do fluxo de calor dos três modos de isolamento do sistema.

Modo de isolamento	Fluxo condutivo	Fluxo convectivo	Fluxo radiativo	Fluxo total
Isolamento com lã de vidro	6,31 W	—	—	6,31 W
Isolamento com uma barreira radiante e presença de ar (superfície 1)	—	3,88 W	1,65 W	5,53 W
Isolamento com uma barreira radiante e c/ presença de vácuo	—	—	2,52 W	2,52 W

Fazendo uma comparação do modo de isolamento com barreira radiante e presença de ar, com o modo de isolamento com barreira radiante com presença de vácuo, pode-se perceber através dos valores de fluxo total que para o isolamento com presença de vácuo a energia perdida é praticamente a metade da energia perdida no sistema com presença de ar.

#### **4.9. Eficiência das configurações de isolamento térmico dos sistemas com superfícies refletivas comparadas ao sistema utilizando lã de vidro.**

A Tabela 4.8 mostra o quanto um sistema é mais eficiente que outro, onde foi utilizada como parâmetro para comparação a lã de vidro, já que a mesma foi a que apresentou uma maior perda de calor.

Tabela 4.8. Comparativo da eficiência dos modos de isolamento térmico.

Modo de isolamento	Eficiência dos modos de isolamento por reflexão com ar e com vácuo, com relação ao modo de isolamento com lã de vidro.	Eficiência do modo de isolamento de barreira radiante com vácuo com relação ao modo de isolamento com barreira radiante com ar.
Isolamento com barreira radiante com ar	12%	-
Isolamento com barreira radiante com vácuo	60%	55%

---

# **CAPÍTULO 5**

## **Conclusões**

---

## **5. CONCLUSÕES**

1. O uso de superfícies refletivas que funcionam como isolantes refletivos é uma forma mais eficiente de conservar energia que o uso de isolantes resistivos convencionais.
2. O sistema construído de barreira radiante com presença de vácuo apresentou o melhor resultado esperado, uma vez que a sua energia perdida foi a menor.
3. A presença de vácuo no sistema de barreira radiante teve uma influência positiva na retenção do fluxo de calor.
4. A diminuição do tempo para o estabelecimento do regime permanente no sistema com vácuo está associada à menor quantidade de matéria no sistema induzindo uma menor inércia térmica.
5. Do ponto de vista operacional, montagem e custo, os isolantes térmicos convencionais ainda podem ser considerados como uma melhor forma de bloquear o fluxo de calor.



---

# **CAPÍTULO 6**

## **Referências Bibliográficas**

---

## **6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ARMELIN, Hugo S. CHERRY, Nigel. *Avaliação do uso e desempenho de barreiras de radiação térmica na construção civil*. Revista e-Mat, V. 1, n.1, p.79-82, Maio 2004.

BRAGA, W. *Análise transiente de problemas térmicos*. Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://wwwusers.rdc.puc-rio.br/wbraga/transcal/pdf/Papers/RAb03.PDF>>.

COELHO, A.C.V, TOFFOLI, S.M, OPPENHEIM, I.F.C. *Propriedades óticas dos materiais*.USP.

CUNHA, C. G. da. NEUMANN, Walter. *Manual de impermeabilização e isolamento térmico – Como projetar e executar*. Rio de Janeiro, RJ. 1979.

DARÉ, C.A.N, TARGA, L.A, ISA, M.M. *Avaliação da eficiência de isolantes térmicos por reflexão, utilizados como subcoberturas*. Energ. Agric., Botucatu, vol.20, n.2, 2005, p.14-29.

Department of Energy/CE-0335P. Assistant Secretary. *Energy Efficiency and Renewable Energy. Radiant barrier attic fact sheet*, 1991. Disponível em: <[http://www.ornl.gov/sci/roofs+walls/radiant/rb\\_01.html](http://www.ornl.gov/sci/roofs+walls/radiant/rb_01.html)>, ultimo acesso em outubro de 2010.

Energy efficiency & renewable energy. U.S. Department of energy. Disponível em: <[http://www.energysavers.gov/your\\_home/insulation\\_airsealing/index.cfm/mytopic=11680](http://www.energysavers.gov/your_home/insulation_airsealing/index.cfm/mytopic=11680)>.

FAREY, Philip. *Radiant Energy Transfer and Radiant Barrier Systems in Buildings*, Florida Solar Energy Center, Publication DN – 6, 1994a.

FILHO, W.B. *Transmissão de calor*. São Paulo: THOMSON, 2004.

HOLANDA, A; TIGRE, D; MOURA, E; ADEILDA, G; BATISTA, J. *Vidros refletivos e o efeito sobre a carga térmica das edificações*. Recife, 2007.

[HTTP://WWW.HIGHER.COM.BR](http://WWW.HIGHER.COM.BR)

INCROPERA, F. P, DEWITT, D. P, BERGMAN, T.L, LAVINE, A.S. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

MEDINA, M.A. *Efects of shingle absorptivity, radiant barrier emissivity, attic ventilation flowrate, and roof slope on the performance of radiant barriers*. International Journal of Energy Research, v. 24, p. 665-78, 2000 b.

- MEDINA, M.A. *On the performance of radiant barriers in combination with different attic insulation levels*. Architectural Engineering department, The University of Kansas, Energy and Buildings, May, 2000.
- MICHELS, C. *Análise da transferência de calor em coberturas com barreiras radiantes*. Florianópolis - SC, 2006.
- MODEST, M. F. *Radiative heat transfer*. Singapore: McGraw Hill Int. Editions, 1993, Singapore, 832 p.
- NETO, C.B. *Apostila de transferência de calor – Isolamento térmico*. Vol II, Mód 2. Instituto Federal de Santa Catarina, 2009.
- NICOLAU, V.P. GUTHS, S. *Medição de emissividade e de temperatura sem contato – Experimento didático / Emissivity and non-contact temperature measurement*. Florianópolis – SC. COBEM -1997.
- PACHÊCO, A.P, *Emissividade de superfícies naturais no infravermelho termal*. Anais IX simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, Santos, Brasil, 11-18 setembro 1998, INPE, p. 1307-1313.
- PARK, K.J, ALONSO, L.F.T, NUNES, A.F. *Determinação experimental da condutividade e difusividade térmica de grãos em regime permanente*. Ciênc. Tecnol. Aliment. vol.19 n.2 Campinas May/Aug. 1999.
- PERIN, A.L. *Desenvolvimento de um equipamento para medição de emissividade*. Porto Alegre, 2009.
- Radiant Barriers. *A new strategy for fighting the summer heat*. Energy and Mineral Resources, Vol. 11, number 4, June – July 1985.
- RoMiotto, Instrumentos de Medição Ltda. *Como determinar a emissividade dos objetos*. Disponível em: <http://www.romiotto.com.br>. Pesquisado em 17/10/2010.
- SONNTAG, R.E, BORGNAKKE, C. *Introdução à termodinâmica para engenharia*. University of Michigan, 2000.
- VECCHIA, F. *Isolamento por reflexão*. VI encontro nacional e III encontro latino-americano sobre conforto no ambiente construído, São Pedro, SP, Brasi, 11 a 14 de novembro de 2001 – Promoção ANTAC.
- VITTORINO, F. SATO, N.M.N. AKUTSU, M. *Desempenho térmico de isolantes refletivos e barreiras radiantes aplicados em coberturas*. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2003, Curitiba, Paraná. ENCAC, p. 1277-1284.