

GABRIEL DE OLIVEIRA MAITINO PORTO

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE UMA BANCADA PARA
MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE SUPERFÍCIES

Guaratinguetá

2016

GABRIEL DE OLIVEIRA MAITINO PORTO

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE UMA BANCADA PARA
MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE DE SUPERFÍCIES

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Matelli

Guaratinguetá

2016

P853p	Porto, Gabriel de Oliveira Maitino Desenvolvimento de um protótipo de uma bancada para medição da emissividade de superfícies / Gabriel de Oliveira Maitino Porto – Guaratinguetá, 2016. 30 f : il. Bibliografia: f. 30 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016. Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Matelli Coorientador: Prof. Dr. Alex Bimbato 1. Radiação 2. Emissividade 3. Planejamento experimental 4. Calorimetria I. Título CDU 535.2
-------	--

GABRIEL DE OLIVEIRA MAITINO PORTO

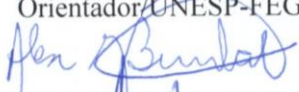
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

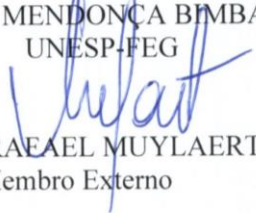
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MATELLI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. ALEX MENDONÇA BIMBATO
UNESP-FEG


Eng. RAAEL MUYLAERT
Membro Externo

Dezembro 2016

À minha mãe e ao meu irmão que sempre estiveram comigo.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me dado a família que tenho, me suportando e apoiando em todos os momentos, dando força e motivação para alcançar meus sonhos.

à minha mãe, *Lucy Mara de Oliveira*, por ter me dado as oportunidades para focar nos estudos, uma boa educação para entender melhor a vida e o carinho nas horas de angústia.

ao *Prof. Dr. José Alexandre Matelli*, que me apoiou e me motivou a escrever essa monografia compartilhando conhecimento e tempo para que pudesse ser realizado.

ao técnico *Antonio Augusto Rizzato*, que me ajudou desde o início a concretizar o projeto, dando boas ideias e realizando todas as atividades relativas à usinagem.

aos meus amigos *Carlos Eduardo Nascimento Cardoso, Lucas Pinheiro Bernardes, Rafael Muylaert, Henrique Manço Dutra, Flávio Yuiti Hiraoka, Filipe Medeiros Moreno, Sérgio Ricardo Shimoï Takahashi e Hugo Flório Sgobbi*, por todos os momentos compartilhados durante estes anos e a preservação de amizades verdadeiras.

aos meus amigos e irmãos da república HROMEU que me ensinaram como ser uma pessoa melhor.

“Não existe triunfo sem perda,
não há vitória sem sofrimento,
não há liberdade sem sacrifício.”

- J.R.R. Tolkien

RESUMO

A dificuldade em encontrar bancadas que possam medir a emissividade de superfícies planas que sejam de fácil acesso e montagem é grande. Didaticamente, apresentar a radiação é de certa forma intuitiva, contudo seus conceitos podem ser confusos em um primeiro contato, daí se parte a iniciativa deste projeto. Portanto, este trabalho apresenta uma metodologia para projeto e construção de uma bancada que determine a emissividade de superfície pelo método calorimétrico, utilizando um corpo cilíndrico, dois discos de aço carbono como emissor e receptor, uma bomba de vácuo e uma fonte de calor controlada. O método calorimétrico utiliza das temperaturas medidas nos corpos de prova para cálculo da emissividade da superfície do material, baseando-se em equações clássicas da transferência de calor o que o torna um método eficaz para o ensino desta propriedade. Atendendo ao ponto de baixo custo, praticamente todo o experimento é montado com materiais disponíveis no campus.

PALAVRAS-CHAVE: Radiação. Emissividade. Bancada.

ABSTRACT

The difficulty in finding benches that can measure the emissivity of flat surfaces that are easy to access and assemble is great. Didactically, presenting the radiation is somewhat intuitive, yet its concepts can be confusing in a first contact, hence the initiative of this project. Therefore, this work presents a methodology for the design and construction of a bench that determines the surface emissivity by the calorimetric method, using a cylindrical body, two carbon steel disks as emitter and receiver, a vacuum pump and a controlled heat source. The calorimetric method uses the measured temperatures in the specimens to calculate the surface emissivity of the material, based on classical equations of heat transfer, which makes it an effective method for the teaching of this property. Given the low cost point, virtually the entire experiment is assembled with materials available on campus.

KEYWORDS: Thermal radiation, emissivity, stand.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Espectro de radiação eletromagnética	13
Figura 2 - Ângulo sólido	14
Figura 3 - Distribuição de Planck.....	16
Figura 4 - Pequeno corpo imerso em um ambiente isotérmico	18
Figura 5 - Determinação do fator de forma entre duas superfícies	19
Figura 6 - Esquema da bancada em CAD	22
Figura 7 - Projeto montado.....	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados Geométricos	26
Tabela 2 - Temperaturas Aferidas	27
Tabela 3 - Emissividade apontada por temperatura aferida	28

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO GERAL:	12
1.1.1	Objetivos específicos:	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1	INTENSIDADE DE RADIAÇÃO	14
2.1.1	Corpo negro	15
2.1.2	Distribuição de planck	15
2.2	DEFINIÇÕES DAS PROPRIEDADES EMISSIVAS DE SUPERFÍCIES.....	16
2.2.1	Emissividade	16
2.2.2	Absortividade.....	17
2.2.3	Refletividade.....	17
2.2.4	Lei de kirchhoff	17
2.3	FATOR DE FORMA.....	18
2.4	CONSIDERAÇÕES PARA TROCA DE CALOR EM CAVIDADES.....	20
2.5	TRANSFERÊNCIA DE CALOR COMBINADA.....	20
2.6	MÉTODO CALORIMÉTRICO PARA MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE.....	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1	PROJETO CONCEITUAL DA BANCADA EXPERIMENTAL	22
3.2	MATERIAIS..	24
3.2.1	Aço inox	24
3.2.2	O-ring	24
3.2.3	Termopar	24
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	25
4.1	PROJETO REAL.....	25
4.2	RESULTADOS.....	26
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	29
	REFERÊNCIAS	30

1 INTRODUÇÃO

Estando em foco a busca por energias cada vez mais limpas no Brasil e no mundo devido às crises hídricas, acidentes nucleares e dificuldades em transferir energia elétrica em locais de difícil acesso, faz-se necessário estudar as propriedades que regem cada uma das alternativas energéticas de baixo impacto ambiental para suprir as necessidades do mercado; uma delas é a radiação térmica.

Todo corpo, com temperatura acima de zero absoluto, independentemente da cor, formato ou pressão aplicada, sempre emite radiação. Os fenômenos de radiação são classificados a partir de seu comprimento de onda característico e isso está diretamente ligado a como são produzidos. Um exemplo apresentado por Kreith (2003) é um metal bombardeado por elétrons em alta frequência emitindo assim raios X, em comparação a cristais que podem emitir ondas de rádio de grandes comprimentos de onda.

Estudar a emissividade é muito complexo, pois sua medição é dependente de inúmeros fatores que dificilmente são constantes em uma situação real, tal como; temperatura do meio, superfície estudada, variação do fluido na qual está inserido, dentre outras. O que faça com que o pesquisador por vezes elimine ou reduza estes fatores externos para isolar a radiação. O projeto em questão busca trabalhar com o mínimo possível de variáveis e assim, encontrar uma emissividade constante na superfície ensaiada.

Para o desenvolvimento do tema de forma abrangente, são estudadas teorias, equações e mesmo a história por trás da radiação.

Sendo assim, o presente trabalho visa apresentar o projeto, construção e validação de uma bancada para o estudo da emissividade de superfícies planas.

1.1 OBJETIVO GERAL:

Projetar e construir uma bancada para medição da emissividade de superfícies.

1.1.1 Objetivos específicos:

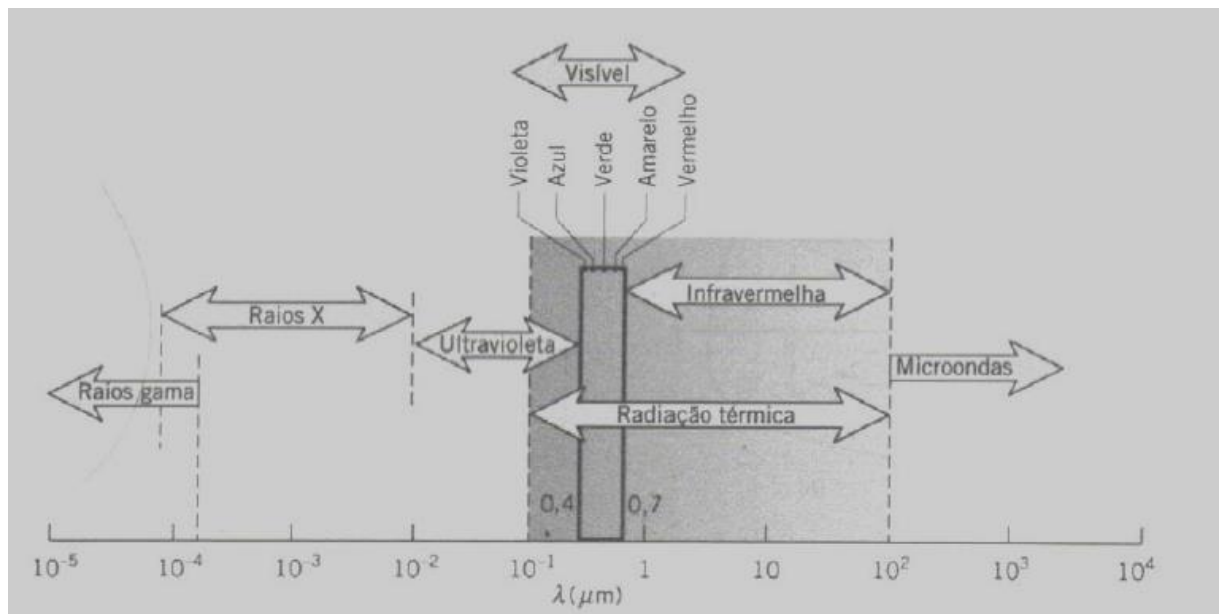
1. Projeto da bancada para medição da propriedade emissiva de superfícies de modo que tenha baixo custo e de fácil reprodução;
2. Discussão dos valores encontrados para a emissividade da superfície testada quando comparada com a literatura.
3. Busca por melhorias no projeto para o futuro.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ao analisar qualquer corpo submetido ao vácuo e a uma certa temperatura T , com distância qualquer de outro corpo com temperatura T_1 diferente de T , intuitivamente sabe-se que ambas as temperaturas irão igualar-se em um dado momento. Essa troca de calor dá-se por radiação térmica, descrito por Incropera (2003) como a associação da radiação térmica à taxa em que a energia emitida pela superfície da matéria como resultado de sua temperatura acima de zero absoluto.

A radiação térmica está definida no espectro eletromagnético para comprimentos de onda de aproximadamente 0,1 a 100 μm , descrito que “uma vez que a radiação emitida pelos corpos por causa de sua temperatura cai quase inteiramente nesse intervalo de comprimento de onda. Assim a radiação térmica inclui a totalidade das radiações visível e infravermelha, bem como parte da radiação ultravioleta (UV).” (Çengel, 2012, pág 685). Tal afirmação pode ser vista na figura 1.

Figura 1 - Espectro de radiação eletromagnética



Fonte: Incropera (2003)

2.1 INTENSIDADE DE RADIAÇÃO

Todo material, ao transferir calor por meio da radiação, o faz com certa intensidade.

Essa intensidade é a relação entre a energia emitida em um dado tempo e em uma dada área, por um ângulo sólido por unidade de área normal ao ângulo de saída θ do emissor.

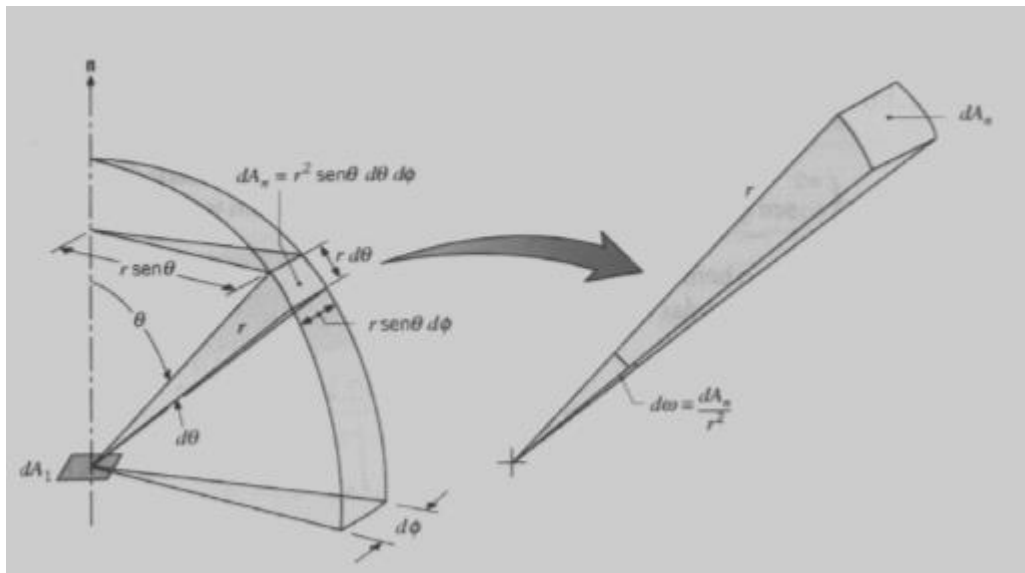
A intensidade de radiação é apresentada conforme a equação (1):

$$I = \frac{dq}{\cos\theta dA_n d\omega} \quad (1)$$

Sendo $d\omega$ o ângulo sólido formado pela direção na qual ocorre a emissão, apontado conforme os ângulos zênite e azimutal em um sistema de coordenadas esféricas.

Este ângulo sólido é referente a uma área dA onde a radiação passa conforme apresentado na figura 2:

Figura 2 - Ângulo sólido



Fonte: Incropera (2003)

A equação (2) demonstra como obter o ângulo sólido $d\omega$ em relação à área delimitada:

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

Substituindo e integrando em $d\theta$ e $d\phi$ chega-se a equação (5).

$$(q/A)_r = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I(\theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad (3)$$

Considerando-se um intervalo $d\lambda$, a intensidade espectral da banda será “ I_λ ”. A intensidade espectral total determinada pela equação (4).

$$I = \int_{\lambda=0}^{\infty} I_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

2.1.1 Corpo negro

O corpo negro é a superfície ideal para a radiação e é utilizado como padrão de comparação para materiais submetidos a certas condições.

Os conceitos que o definem são:

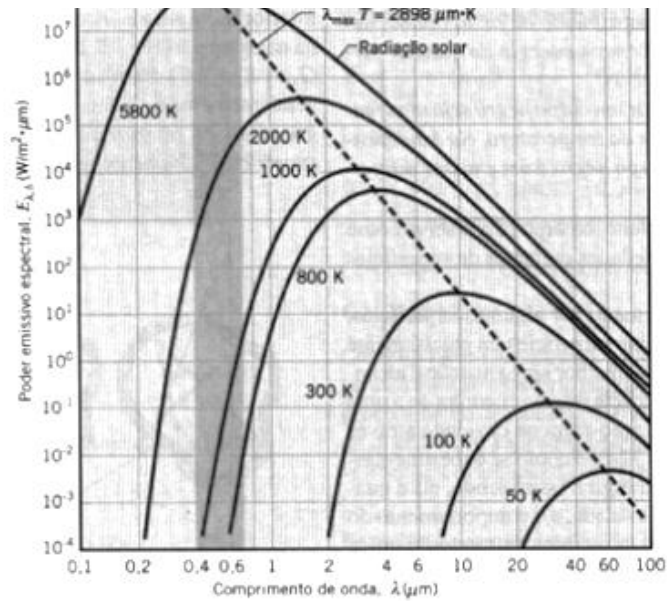
- Para qualquer comprimento de onda em qualquer temperatura a ser medida, nenhum outro corpo absorve ou emite mais energia que um corpo negro
- Independente da temperatura e do comprimento de onda o corpo negro emite radiação igualmente em todas as direções, ou seja, é um emissor difuso.

2.1.2 Distribuição de Planck

A variação de quantidade de energia radiante emitida por um corpo negro foi primeiramente determinada por estatística quântica por Planck. A lei de Planck da radiação do corpo negro apresenta a radiância espectral variando com o comprimento de onda e a temperatura do corpo negro, conforme a equação (5).

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^2}{c^2} \frac{1}{(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1)} \quad (5)$$

Sua distribuição é apresentada em curvas, conforme a figura 3.

Figura 3 - Distribuição de Planck

Fonte: Perin (2009)

2.2 DEFINIÇÕES DAS PROPRIEDADES EMISSIVAS DE SUPERFÍCIES

2.2.1 Emissividade

Conforme Çengel (2012), a emissividade é a relação da radiação emitida pela superfície de um corpo a uma certa temperatura e a radiação emitida por um corpo negro sob as mesmas condições. Por ser uma relação na qual o corpo negro não pode ser superado, sua variação mantém-se para o intervalo de 0 a 1, podendo alcançar os extremos. A emissividade não é uma propriedade constante, podendo ser alterada com mudanças na superfície do material, coloração, forma e variação de temperatura. Se considerar a condição elementar da emissividade a uma temperatura definida, encontra-se a emissividade espectral direcional, onde a relação se dá pela intensidade de radiação emitida pela superfície do material a uma determinada direção e comprimento de onda pela intensidade de radiação da superfície de um corpo negro sob as mesmas condições, apresentado conforme a equação (6).

$$\varepsilon_{\lambda\theta}(\lambda, \phi, \theta, T) = \frac{I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda,b}(\lambda, T)} \quad (6)$$

Sendo que os índices λ e θ são utilizadas para apontar as naturezas espectrais e direcionais, nesta ordem. Caso utilize-se de intensidades totais, encontra-se a emissividade direcional total, ou seja, a integral ou soma de todas as emissividades parciais relativas aos comprimentos de onda, isso é demonstrado pela equação (7).

$$\varepsilon_{\lambda}(\phi, \theta, T) = \frac{I_e(\theta, \phi, T)}{I_{\lambda}(T)} \quad (7)$$

2.2.2 Absortividade

A absortividade é a propriedade que mede a quantidade de radiação absorvida por uma superfície; tal medição depende da direção e do espectro de luz que está incidindo, assim como da emissividade. Segundo Incropera (2003), a absortividade espectral de uma superfície é definida como a fração de intensidade incidente nas direções λ e θ absorvidas pela superfície, conforme descrita pela equação (8).

$$\alpha_{\lambda, \theta}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda, i, \text{abs}}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda, i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad (8)$$

2.2.3 Refletividade

A refletividade apresenta a quantidade de radiação refletida pela superfície, assim como a absortividade é uma relação de intensidades de radiação para uma direção e um espectro pré-definido. A equação (9) apresenta essa relação.

$$\rho(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda, i, \text{ref}}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda, i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad (9)$$

2.2.4 Lei de kirchhoff

Ao considerar um pequeno corpo de área de superfície A emissividade ε e absortividade α a uma temperatura T pré-definida contida em um ambiente isotérmico, conforme figura 4. Pode-se considerar que qualquer ambiente isotérmico grande age conforme um corpo negro, portanto a radiação que incide no corpo do pequeno objeto é igual à

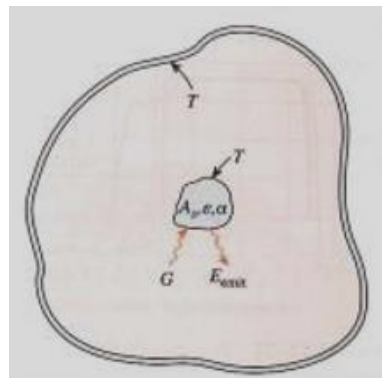
radiação emitida pelo corpo negro na temperatura T ., Portanto, $G=E_b(T) = \alpha\sigma T^4$ e a radiação que o objeto absorve é $G_{abs} = \alpha G = \alpha\sigma T^4$.

Ao considerar que tanto o objeto quanto a região na qual está inserido estão em equilíbrio térmico, a taxa de transferência de calor é zero. Sendo assim, sua radiação absorvida deve ser igual à sua radiação emitida. Ou seja:

$$\varepsilon(T) = \alpha(T)$$

Conforme Çengel (2012), a emissividade hemisférica total na superfície a uma temperatura T é igual a sua absortividade hemisférica total para a radiação vinda do corpo negro na temperatura T .

Figura 4 - Pequeno corpo imerso em um ambiente isotérmico

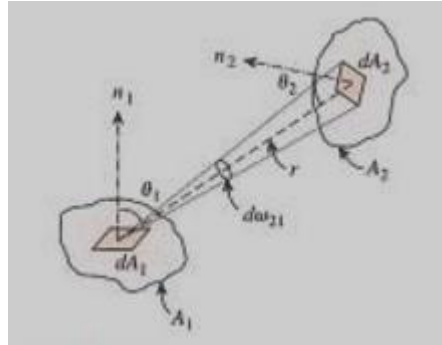


Fonte: Çengel (2012)

2.3 FATOR DE FORMA

O fator de forma, fator de vista ou de visão é definido como sendo *a fração de radiação que deixa a superfície i e é interceptada pela superfície j*. (Kreith, 2001). Para definir uma expressão para o fator de forma é necessário considerar duas superfícies diferenciais distantes r uma da outra, orientadas arbitrariamente com ângulos θ_1 e θ_2 normais à linha que liga as superfícies, conforme demonstrado na figura abaixo:

Figura 5 - Determinação do fator de forma entre duas superfícies



Fonte: Çengel (2012)

Considerando a taxa que deixa dA_1 na direção de θ_1 sendo igual a $I_1 \cos \theta_1 dA_1$ e que a $d\omega_{21} = dA_2 \cos \theta_2 / r^2$ a quantidade de radiação que chega à dA_2 , ao que segue pela equação (10).

$$Q_{dA_1 \rightarrow dA_2} = I_1 \cos \theta_1 dA_1 d\omega_{21} = I_1 \cos \theta_1 dA_1 \frac{I_2 \cos \theta_2}{r^2} \quad (10)$$

Para uma obtenção completa da taxa total de radiação que deixa dA_1 em todos os sentidos, utiliza-se a radiosidade J , conforme a equação (11)

$$Q_{dA_1} = J_1 dA_1 = \pi I_1 dA_1 \quad (11)$$

Para o trabalho em questão, será utilizado o fator de forma de discos coaxiais e paralelos que é dado conforme as equações (12) e (13).

$$R = r/L \quad (12)$$

$$F_{ij} = 1 + \frac{1 - \sqrt{4R^2 + 1}}{2R^2} \quad (13)$$

Existem ainda duas propriedades de suma importância para fatores de forma que favorecem a determinação dos valores de FF quando se possui um prévio conhecimento de outros FF:

São elas a relação de reciprocidade e a regra do somatório (Kreith, 2001)

Relação de reciprocidade:

$$A_i F_{i \rightarrow j} = A_j F_{j \rightarrow i}$$

Regra do somatório:

$$\sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} = 1$$

2.4 CONSIDERAÇÕES PARA TROCA DE CALOR EM CAVIDADES

Para utilizar o método de troca de radiação para superfícies reais a ser usado neste trabalho, é necessário ressaltar algumas considerações a fim de simplificar de forma aceitável a condição de projeto.

Seguem os parâmetros adotados:

- As superfícies serão consideradas cinzas e difusas (não são dependentes nem do comprimento de onda nem da direção).
- As superfícies são opacas, ou seja, $\epsilon + \beta = 1$.
- O espaço interno estará submetido ao vácuo.
- A temperatura é constante sobre a superfície de cada zona.
- O fluxo de calor resultante é constante para cada zona.

2.5 TRANSFERÊNCIA DE CALOR COMBINADA

A transferência de calor é baseada em três mecanismos: radiação, condução e convecção. Para a maioria das situações, todos os três agem em conjunto.

As equações que regem cada um dos mecanismos estão apresentadas conforme as equações (14), (15) e (16).

$$q_{condução} = \frac{kA(T_2 - T_1)}{L} \quad (14)$$

Sendo k , a condutividade térmica do material em W/m.K, T a temperatura da superfície ou 1 ou 2 em Kelvin e L a espessura de parede em metros. A equação (14) é conhecida como a lei de Fourier.

$$q_{convecção} = h_{2\infty} A (T_{\infty} - T_2) \quad (15)$$

Sendo h o coeficiente de convecção ou coeficiente de transferência térmica em W/m²K e A a área de contato entre os materiais.

$$q_{radiação} = \sigma A (T_2^4 - T_1^4) \quad (16)$$

Sendo σ o coeficiente de Stephan Boltzmann e A a área emissora.

2.6 MÉTODO CALORIMÉTRICO PARA MEDIÇÃO DA EMISSIVIDADE

Determinar o valor experimental da emissividade dos materiais de forma assertiva para qualquer temperatura é sempre difícil. Todo experimento está sujeito a alterações não definidas no início da modelagem e a efeitos externos que possam surgir. Existem basicamente dois métodos para análise da emissividade dos materiais: radiométrico e calorimétrico.

O método radiométrico possui como base sensores de radiação que medem sua variação e geram sinais elétricos referentes ao fluxo de energia que estão medindo.

O método calorimétrico é baseado no balanço de energia do sistema e sua procura em ater o fluxo de calor constante e sem perdas para o meio.

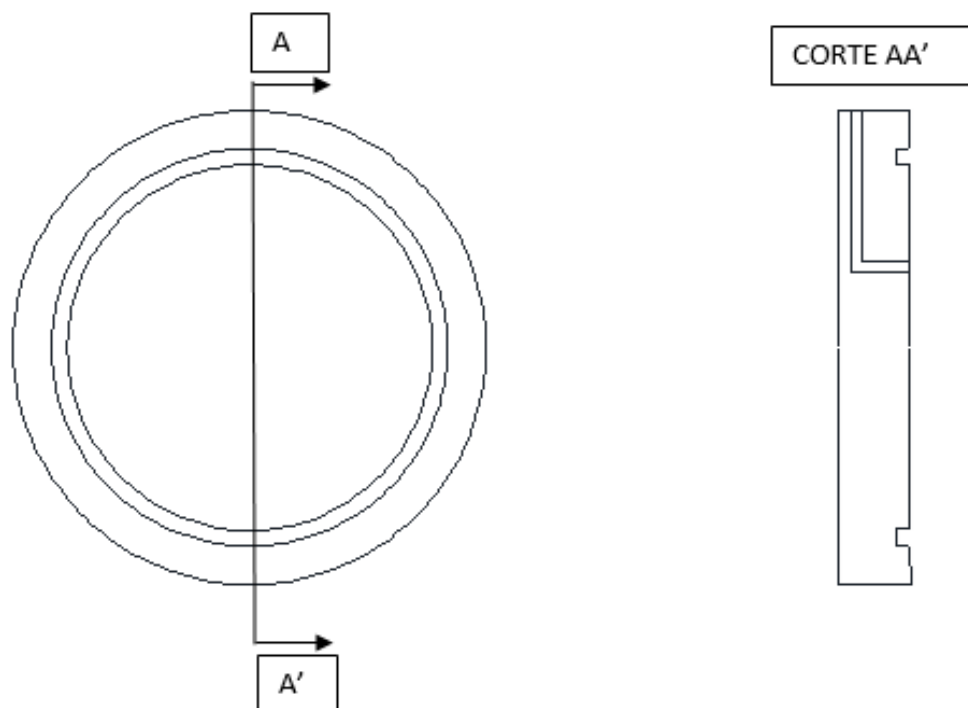
Este trabalho baseia-se no método calorimétrico para a análise da emissividade dos materiais, pois possui baixo custo de montagem, muito mais eficiente para didática e estudo de melhorias.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PROJETO CONCEITUAL DA BANCADA EXPERIMENTAL

Ao considerar os materiais disponíveis para iniciar o projeto, há a necessidade de analisar a melhor forma de manter o fluxo de calor unidimensional e constante. Para tal, as extremidades da bancada são seladas por uma placa emissora e uma receptora não necessariamente do mesmo material. O corpo cilíndrico de parede grossa foi escolhido para suportar a pressão da bomba de vácuo e a bolsa de gelo mantém a temperatura da superfície externa do receptor constante. A figura 6 apresenta o desenho das placas emissora e receptora para a usinagem.

Figura 6 - Esquema da bancada em CAD



Fonte: Autor (2016).

A bomba de vácuo força o fluxo de calor a ser mantido por condução através das paredes e por radiação do emissor ao receptor. Além de O-Rings dispostos nos encaixes entre o corpo da bancada e os corpos de prova que servirão tanto de vedação interna quanto de isolante térmico devido às suas propriedades.

O primeiro passo é decidir, pelo volume de controle, onde é aplicada a lei de conservação de energia. Para a bancada, o volume é a superfície interna do receptor, que passa pela camisa e pela madeira que a envolve e finalizando na superfície externa do emissor. Vale lembrar que nem todo o fluxo radiante das paredes chega ao receptor, portanto o fator de forma também deve ser calculado.

Para o método calorimétrico de baixa temperatura, qualquer variação da potência não medida gera uma grande mudança no resultado. Uma vez que a potência térmica é transferida para a camisa por condução e para o receptor por radiação, as perdas esperadas devem ser contabilizadas.

Com isso, a equação que rege a bancada será dada pela potência térmica dissipada no emissor igualada à soma das potências térmicas por condução e radiação no interior do projeto.

O primeiro cálculo a ser realizado é o fator de forma entre dois discos concêntricos e de raios iguais a uma distância L .

A equação (12) e (13) que

A energia que entra é a variação entre as temperaturas do emissor transferidas por condução.

Com o balanço já indicado e as equações (12), (13), (14), (15) e (16) chega-se na equação (17)

$$\frac{kA(T_0 - T_1)}{e} = \frac{kA(T_2 - T_1)}{L} + hA(T_\infty - T_2) + F_{ij}\sigma(\varepsilon_2)A(T_2^4) + F_{ji}\sigma(\varepsilon_1)A(T_1^4) + F_{ik}\sigma\varepsilon_1A(T_3^4) \quad (17)$$

Desconsiderando a convecção atuante, pois o meio está sob o efeito de vácuo, e considerando que a condução é a somatória de todas as partes da bancada, pode-se simplificar a equação para:

$$\frac{kA(T_0 - T_1)}{e} = \frac{kA(T_2 - T_1)}{L} + F_{ij}\sigma(\varepsilon_2)A(T_2^4) + F_{ji}\sigma(\varepsilon_1)A(T_1^4) + F_{ik}\sigma\varepsilon_1A(T_3^4) \quad 3.4$$

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Aço inox

O aço utilizado para a usinagem do receptor e emissor é inoxidável, contudo, não foi encontrado qualquer data sheet sobre o material. O coeficiente de condução considerado foi de 15W/m.K.

3.2.2 O-ring

Foi-se utilizado o-ring de fita de diâmetro de 1mm. Foi decidido por esse o-ring pois facilitava sua colocação nas placas.

Os o-rings que foram designados são de polietileno já que sua resistência térmica é alta e bloqueia a condução de calor nas paredes do projeto.

3.2.3 Termopar

Termopares são aparelhos que utilizam da variação de temperatura entre dois pontos de contato para gerar uma diferença de potencial. Em 1822, Thomas Seebeck acidentalmente descobriu que quando dois fios metálicos são unidos em um circuito elétrico e um dos fios está com temperatura diferente do outro, é gerada uma corrente elétrica. Ao ligá-los a um galvanômetro é possível verificar essa diferença de temperatura.

TERMOPAR TIPO K

Com uma composição química de NiCr-Ni, sendo Chromel com Ni90 Cr10 e o Alumel com composição de Ni95,4, Mn1,8, Si1,6 e Al 1,2.

Para o projeto, o termopar do tipo K foi utilizado em todas as medições.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 PROJETO

Na camisa está instalado um cilindro oco de madeira maciça para diminuir o fluxo de calor para o exterior do projeto. A peça foi usinada para manter a uniformidade e direção do calor. No interior das placas estão inseridos termopares do tipo K para obtenção das variações de temperatura até o estado de equilíbrio. Outro termopar está instalado entre a placa da fonte de calor e a placa emissora, uma camada de alumina protege o termopar de encostar na superfície da fonte de calor. Na placa superior são colocados cubos de gelo e água para manutenção da temperatura da superfície exterior. O projeto real montado está conforma figura 7.

Figura 7 - Projeto montado



Fonte: Autor (2016)

Os dados do projeto final estão conforme a tabela 1.

Tabela 1 - Dados Geométricos

Dados de Projeto			
Símbolo	Valor	Unidade	Obs.
L	0,0530	m	Distância entre discos
ϵ_1	0,9800		Emissividade corpo negro
D1	0,1397	m	Diâmetro da chapa
D2	0,1397	m	Diâmetro externo da camisa
D3	0,1297	m	Diâmetro interno da camisa
D4	0,0010	m	Diâmetro O-Ring
D5	0,1697	m	Diâmetro externo do anel de madeira
k1	15,0000	W/m. K	Aço Inox
k2	0,1300	W/m. K	Borracha Polietileno
k3	15,0000	W/m. K	Aço parede
K4	0,1300	W/m. K	Madeira
Σ	5,6704E-08	W/m ² K ⁴	Constante de Stefan-Boltzmann
E	0,0080	m	Espessura da placa
Dados geométricos			
A1	0,0132	m ²	Área dos discos
A2	0,0021	m ²	Área transversal da camisa/O-Ring
A3	0,0216	m ²	Área da superfície camisa
A4	0,0283	m ²	Área transversal da madeira

Fonte: Autor (2016)

Basta calcular os dados geométricos do projeto, como segue:

$$A_{circular} = \pi \frac{D_1^2}{4} = \pi \frac{0,1397^2}{4} = 0,0132m^2$$

$$A_{transversal\ da\ camisa} = \pi \frac{D_2^2}{4} - \pi \frac{D_3^2}{4} = \pi \frac{0,1397^2}{4} - \pi \frac{0,1297^2}{4} = 0,0021m^2$$

$$A_{superficie\ da\ camisa} = \pi D_3 L = 0,1397 \times 0,053 \times \pi = 0,0216m^2$$

$$A_{\acute{a}rea\ transversal\ da\ madeira} = \pi D_5 L = 0,1697 \times 0,053 \times \pi = 0,0282m^2$$

4.2 RESULTADOS

Para o projeto, no total foram realizadas cerca de vinte medições; no entanto, quatorze delas foram desconsideradas por erros de medição no termopar. O tempo para alcançar

o regime permanente foi de 90 minutos por contagem. No total, seis contagens foram aferidas com sucesso.

As temperaturas encontradas em cada ponto de medição estão conforme a tabela 2:

Tabela 2 - Temperaturas Aferidas

Tfonte (K)	Temissor (K)	Tcorpo (K)	Treceptor (K)	Tgelo (K)
479,4	446,4	353	319,5	314,5
477,4	445,4	352	322,3	315,1
479,9	446,9	356	320,3	317,5
480,5	447,3	357	319,7	313,5
481,1	447,4	356	317,6	318,5

Fonte: Autor (2016)

Com os dados acima é possível calcular todas as parcelas de energia. A primeira parte é calcular a quantidade de energia que é inserida no interior do projeto; para isso, deve-se utilizar a lei de Fourier conforme a equação 2.14. Portanto:

$$Q_{entrada} = k_{aço} A_1 \frac{(T_{cooktop} - T_{emissor})}{e} = 15 \times 0,0132 \times \frac{479,4 - 446,4}{0,008} = 817,9903 W$$

A mesma equação deve ser aplicada para a condução do cilindro do projeto:

$$Q_{camisa} = (k_{aço} + 2k_{PE}) A_2 \frac{(T_{emissor} - T_{receptor})}{L}$$

$$= (15 + 2 \times 0,13) \times 0,0021 \times \frac{446,4 - 319,5}{0,008} = 788,9283 W$$

No caso da radiação o fator de forma deve ser calculado antes; portanto, conforme a equação 3.1 tem-se:

$$R = r/L = 0,1397/0,0530 = 2,6358$$

$$F_{ij} = 1 + \frac{1 - \sqrt{4R^2 + 1}}{2R^2} = 1 + \frac{1 - \sqrt{4 \times 2,6358^2 + 1}}{2 \times 2,6358^2} = 0,3861$$

Pela regra do somatório, o fator de forma das placas para a camisa é:

$$F_{ik} = 1 - 0,3861 = 0,6139$$

E a radiação emitida pela base e da camisa são calculadas utilizando a equação 2.16:

$$q_{rad\ emissor} = F_{ij}\sigma\epsilon A(T_{emissor}^4) = 0,3861 \times 5,6704 \times 10^{-8} \times 0,98 \times 0,0132 \times 446,4^4$$

$$= 11,2560\ W.$$

$$q_{rad\ camisa} = F_{ij}\sigma\epsilon A(T_{camisa}^4) = 0,6139 \times 5,6704 \times 10^{-8} \times 0,98 \times 0,0216 \times 353^4$$

$$= 11,6719\ W.$$

Desse modo a emissividade do material pode ser encontrada por:

$$(\epsilon_2) = \frac{\frac{kA(T_0 - T_1)}{e} F_{ij} - \left[\frac{kA(T_2 - T_1)}{L} + F_{ji}\sigma(\epsilon_1)A(T_1^4) + F_{ik}\sigma\epsilon_1 A(T_3^4) \right]}{A(T_2^4)\sigma}$$

$$(\epsilon_2) = \frac{817,9903 - [788,6283 + 11,2560 + 11,6719]}{0,0132 \times (319,5^4) \times 5,6704 \times 10^{-8}} = 0,4711$$

No total os dados obtidos por temperatura medida estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3 - Emissividade apontada por temperatura aferida

Qentrada (W)	Condução (W)	Radiação Base (W)	Radiação camisa (W)	Condução Camisa/Madeira (W)	Potência Total (W)	Radiação Receptor (W)	Emissividade da placa
817,9903	788,9283	11,2560	11,6719	4,7140	816,5702	3,0146	0,4711
793,7132	765,1759	11,1535	11,5402	4,5181	792,3877	3,1216	0,4246
816,7517	787,3739	11,3116	12,0737	4,7140	815,4732	3,0449	0,4199
823,6880	793,0943	11,3440	12,2100	5,3262	821,9745	3,0221	0,5670
836,0743	806,7737	11,3542	12,0737	4,5916	834,7932	2,9435	0,4352

Fonte: Autor (2016)

A emissividade média encontrada é de 0,4636, valor razoável ao comparar com a literatura, que segundo Çengel (2012) é de 0,30 a 0,40 para aços inoxidáveis levemente oxidados.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A emissividade é uma propriedade relativamente simples, porém complexa de se obter, pois é praticamente impossível de mantê-la isolada de variações do meio, sem a precisão necessária para obter as temperaturas e o perfil mais detalhado da superfície medida, como ranhuras e marcas que possam afetar a medição. Para minimizar efeitos de convecção é utilizado o vácuo interno. No sentido de manter a condução unidimensional é aplicada uma aréola de madeira em torno da camisa de metal. A alumina aplicada na base da fonte de calor mantém o termopar isolado para uma medição somente da superfície externa do emissor.

Os objetivos deste trabalho foram alcançados de maneira satisfatória, a construção simples e de baixo orçamento foram feitas conforme o esperado, com materiais disponíveis no campus e sem geometrias complexas. Os dados que foram aferidos estão bem próximos dos encontrados na literatura, contudo boa parte das medições foram ignoradas devido à baixa precisão que o termopar apresenta. O tempo para garantir o regime permanente é de quarenta minutos no mínimo, sendo a média de tempo de cerca de uma hora e vinte minutos. As perdas de energia para o meio somada a dificuldade em aferir os dados com alta precisão geraram variações nos resultados obtidos. Para diminuir o erro do projeto é importante que a bancada esteja com seu exterior sob efeito de vácuo para diminuir as perdas por convecção.

REFERÊNCIAS

INCROPERA, F. P.; DE WITT, D., P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**, 5. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2003.

KREITH, F. **Princípios da transmissão de calor**, 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.

ÇENGEL, Y. A; GHAJAR., A., J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**, 4. ed. São Paulo: AMGH Editora, 2012.

PERIN, A. L. **Desenvolvimento de um equipamento para medição de emissividade**, 2009, 112p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2009.