

## DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO PARA DETERMINAR A EMISSIVIDADE DE SUPERFÍCIES

Arno Krenzinger

PROMECA, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rua Sarmiento Leite, 425, 90050-170 Porto Alegre RS  
arno@mecanica.ufrgs.br

**Resumo.** Este trabalho apresenta a metodologia empregada para medir a emissividade de superfícies opacas através de um calorímetro fabricado no Laboratório de Energia Solar da UFRGS. O calorímetro mede o fluxo de calor entre duas superfícies paralelas e horizontais, onde a superfície superior é aquecida por uma fonte de corrente elétrica de alta estabilidade. As temperaturas das duas superfícies são determinadas quando o sistema atinge o equilíbrio térmico. A superfície aquecida é protegida por uma guarda térmica fazendo com que toda a potência elétrica seja dissipada à superfície inferior, que por sua vez é refrigerada com um sistema que utiliza pastilhas Peltier. O fluxo de calor é medido e seu valor é utilizado em uma equação onde as emissividades de ambas as superfícies são importantes. A partir de experimentos com superfícies de emissividades conhecidas, parâmetros fixos do equipamento foram determinados estando o mesmo apto a medir a emissividade de superfícies com características desconhecidas. O trabalho analisa também os erros experimentais intrínsecos do instrumento.

**Palavras chave:** emissividade, emitância hemisférica, calorímetro, guarda quente.

### 1. Introdução

Em quase todas as situações reais de transferência de calor, a transferência de calor por radiação está envolvida. Em algumas destas situações, o fluxo de radiação é de muito pequena intensidade e pode ser desprezado, mas na maioria dos casos as trocas de calor sob efeito da radiação são bastante importantes, mesmo quando as temperaturas estão próximas do valor da temperatura ambiente.

A correta utilização dos desenvolvimentos analíticos ou numéricos que permitem determinar as perdas por radiação exige o conhecimento do valor da emissividade superficial dos componentes do sistema térmico. Alguns materiais de procedência conhecida, ou de utilização universal, tem seus valores de emissividade divulgados em tabelas de propriedades de materiais, mas para uma grande variedade de materiais utilizados como componentes de sistemas térmicos específicos são utilizados valores estimados, pela falta de resultados experimentais confiáveis. Análise de conforto em ambientes construídos, cálculo de perdas térmicas em sistemas de armazenamento de energia e aplicações de energia solar são exemplos de situações que demandam o conhecimento da emissividade de tintas e revestimentos ou mesmo de superfícies de diversos materiais em temperaturas próximas à temperatura ambiente.

Com o intuito de se dispor de uma ferramenta experimental capaz de determinar estas grandezas, foi proposto construir um calorímetro para determinar o valor da emissividade de superfícies opacas, através da medida do fluxo de calor radiante entre duas superfícies paralelas, onde uma delas é a amostra em estudo. A determinação da emissividade hemisférica é muitas vezes feita através de medidas óticas de refletividade e transmissividade espectral em uma ampla faixa de comprimentos de onda e depois determinada por integração no espectro de emissão do corpo negro. Estas medidas podem trazer, como inconveniente, erros significativos (Zhang et al. 1996) e devem ser validadas com uso de experimentos para determinar a transferência de calor por radiação entre superfícies. Vários calorímetros já utilizados para determinar a emissividade fazem uso de uma câmara com vácuo e com paredes resfriadas, medindo a curva de resfriamento de uma amostra em seu interior quando a principal forma de transferência de calor é a emissão de radiação através da superfície da mesma amostra (Krenzinger, 1979, Jaworske, 1994). Outros, como no caso do presente trabalho, utilizam uma blindagem térmica ao redor de uma placa quente ou de uma placa fria, garantindo em ambos os casos que o fluxo de calor seja unidirecional e obtendo em regime permanente uma medida absoluta do fluxo de calor, do qual se pode extrair a emissividade (Dey et al. 1998).

### 2. Princípio de funcionamento e construção

A transferência de calor por radiação entre duas superfícies paralelas pode ser calculada com a Eq.(1), onde  $T_1$  e  $T_2$  são as temperaturas absolutas das duas superfícies,  $\epsilon_1$  e  $\epsilon_2$  são suas emissividades,  $A_1$  e  $A_2$  são suas áreas,  $F_{12}$  é o fator de visão entre as duas superfícies e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann.

$$Q_R = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \quad (1)$$

No caso em que as duas superfícies têm mesma área, a Eq. (1) fica reduzida à Eq. (2), a qual mostra que conhecendo a geometria do sistema, as temperaturas, o fluxo de calor por radiação e a emissividade de uma das superfícies, pode-se determinar a emissividade da outra.

$$Q_R = \frac{As(T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1}{e_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1}{e_2} - 2} \quad (2)$$

O equipamento construído mantém duas superfícies em planos paralelos e horizontais separadas por uma camada de ar de 12 mm. A superfície mais quente (placa quente), cuja emissividade é conhecida, está na posição superior, de modo que não haja convecção entre a mesma e a amostra. A placa quente é sustentada por um anel de borracha e por uma estrutura de PVC que toca na superfície da amostra e sela uma câmara de ar sem que haja possibilidade de qualquer movimento de ar externo entre as duas superfícies. A placa quente é construída por um disco de alumínio com uma resistência elétrica instalada em seu interior, sendo a superfície voltada para baixo pintada com tinta preto fosco. A resistência elétrica é isolada por lâminas de mica para impedir circulação de corrente elétrica pelo alumínio. A placa quente é isolada por cima e pelos lados com uma camada de 2 cm de poliuretano expandido. Por fora desta camada de isolamento, foi instalada uma blindagem térmica, composta por uma cápsula (panela) de alumínio com uma resistência elétrica de aço inox distribuída em sua superfície. Durante um ensaio, esta blindagem de alumínio é aquecida à mesma temperatura da placa quente, eliminando os gradientes de temperatura ao redor da placa com exceção da direção vertical para baixo. Por fora da blindagem foram instaladas uma nova camada de isolamento e uma segunda cápsula de maior diâmetro, agora para proteção mecânica.

A Fig. 1 mostra uma fotografia da blindagem térmica montada antes de ser inserida no equipamento. O cabo utilizado para resistência de aquecimento é um cabo de aço inox normalmente utilizado em varal para secagem de roupas, uma alternativa simples e eficaz para montar o elemento. Seu revestimento plástico é útil para assegurar o isolamento elétrico e assim foi enrolado diretamente sobre a cápsula de alumínio sendo fixado com borracha de silicone. A corrente elétrica utilizada sobre o mesmo durante os ensaios é, em geral, menor que 2 ampères.



Figura 1. Blindagem térmica montada com panela de alumínio e cabo de aço inox para varal.

A Fig. 2 mostra três elementos do equipamento: a placa quente já instalada na estrutura de PVC (na fotografia o anel de borracha não está instalado), a cápsula de blindagem térmica e a cápsula de proteção mecânica. Ao encaixar cada um destes elementos, o mesmo foi isolado com poliuretano preenchendo o espaço entre ele e o elemento seguinte. Também antes da montagem foram alojados termopares na placa quente e na blindagem térmica.

A amostra deve ter dimensões maiores que a placa quente com sua blindagem, e é instalada horizontalmente sobre uma mesa refrigerada. A função da mesa é manter a amostra em uma temperatura fixa, abaixo da temperatura da placa quente e retirar o calor transferido da placa quente. A Fig. 3 mostra a disposição de todos os elementos.

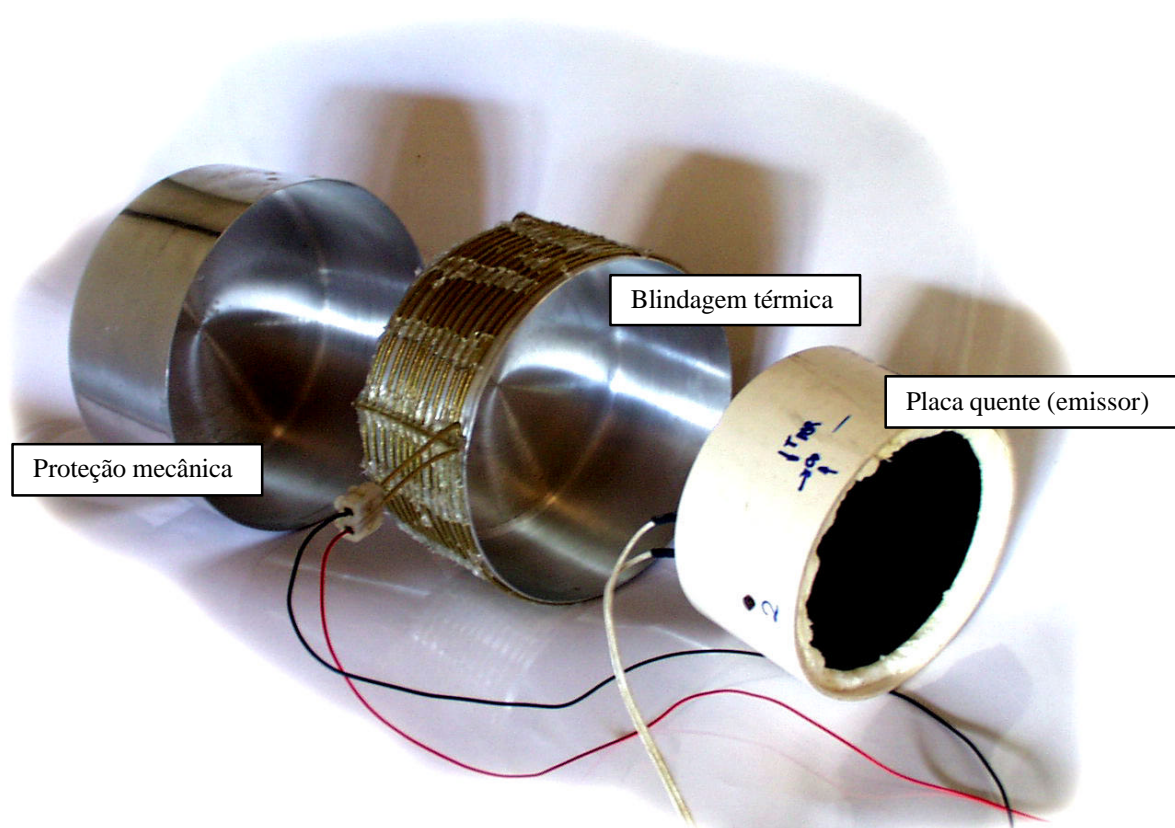


Figura 2. Proteção mecânica, blindagem térmica e placa quente com estrutura de PVC, antes da montagem.

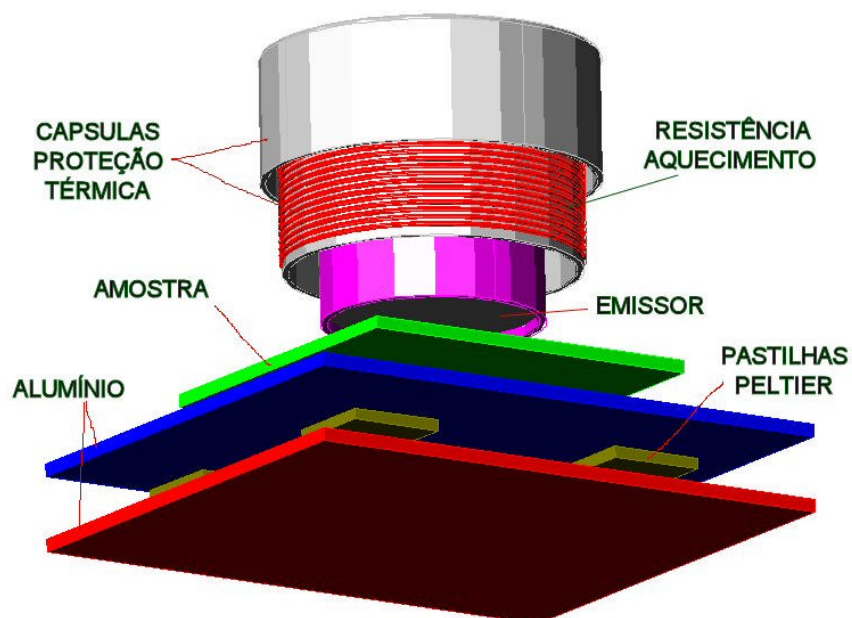


Figura 3. Vista explodida do medidor de emissividade.

A mesa refrigerada foi montada com duas placas de alumínio com 10 mm de espessura. O objetivo de utilizar uma placa espessa é de garantir uma melhor uniformidade de temperatura na face da placa voltada para a amostra. Entre as duas placas de alumínio, como pode ser visto na Fig. 3, foram instaladas pastilhas Peltier.



Uma pastilha Peltier é constituída por pequenos blocos de semicondutores, dopados alternativamente do tipo P e do tipo N, por onde se faz circular uma corrente contínua. Por efeito da deriva provocada pela fonte de corrente, quando os elétrons passam do material P para o N eles absorvem energia (calor) do meio e refrigeram a junção. De forma contrária a corrente libera calor quando os elétrons passam de N para P. As pastilhas Peltier são, portanto, bombas de calor de pequena dimensão. Os blocos de semicondutor são fixados entre duas lâminas de alumina, cerâmica isolante elétrica com condutividade térmica razoável. Conforme a polaridade da fonte de corrente, uma das duas lâminas de alumina aquece enquanto a outra esfria.

As fotografias da Fig. 4 mostram 5 pastilhas distribuídas sobre a superfície da placa de alumínio inferior, mas apenas 4 delas foram utilizadas na refrigeração. A pastilha central foi instalada para indicar o fluxo de calor entre as duas placas utilizando o efeito Seebeck inerente às pastilhas Peltier. Naturalmente uma boa drenagem do calor é necessária na superfície aquecida das pastilhas Peltier, assim uma segunda placa (inferior) de alumínio, conectada a dissipadores também de alumínio e com ventilação forçada, faz o papel de dissipar o calor retirado pelas pastilhas ao ambiente. As 4 pastilhas estão conectadas em série, de forma que a mesma corrente circula por todas. Sua tensão nominal (cada uma) é de 12 volts, sendo então necessária uma fonte de 48 volts para seu acionamento. Quando operam em condições nominais, a corrente drenada pelas pastilhas é de 5 ampères, cada uma consumindo uma potência elétrica de 60 W e com capacidade de refrigeração de aproximadamente 35 W (a carga térmica para dissipar na superfície inferior é, nestas condições, de 90 W por pastilha).

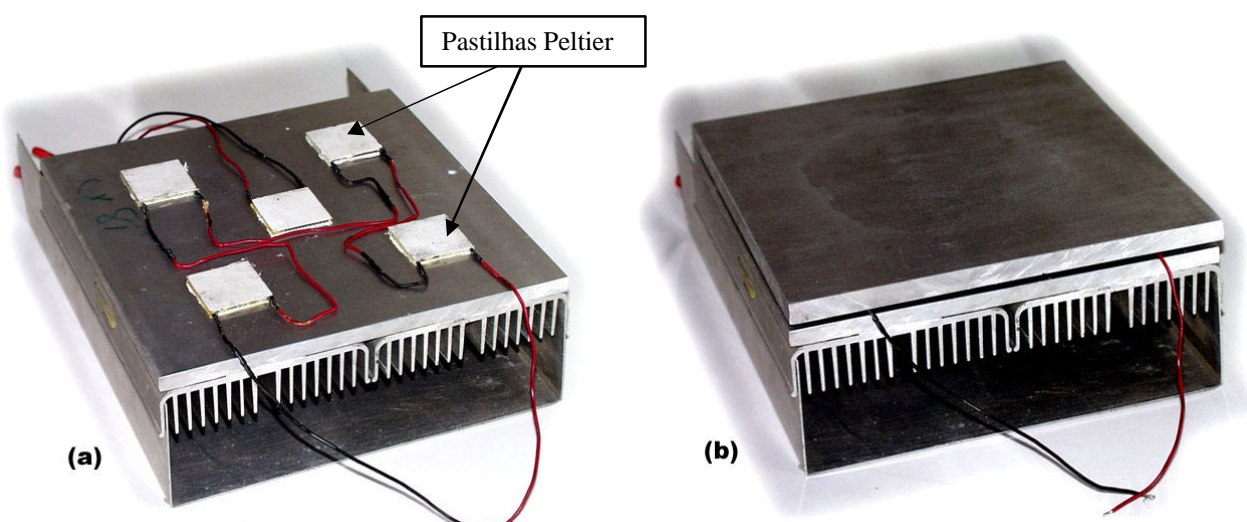


Figura 4. (a) Pastilhas Peltier distribuídas sobre o dissipador e conectadas em série, (b) mesa refrigerada com placa superior de alumínio instalada.

A grande vantagem em utilizar uma mesa refrigerada com pastilhas Peltier em relação a uma mesa refrigerada com circulação de água é a facilidade com que se pode controlar a potência de refrigeração. No caso presente, foi embutido um termopar dentro da placa superior da mesa, aprofundado para que sua junção ficasse próxima da superfície e o fio do termopar percorre um caminho circular em contato com a placa fria para reduzir o erro devido à condução de calor por seus condutores metálicos. O sinal deste termopar é levado ao computador por meio de uma unidade de aquisição de dados e o programa produz, através de um conversor digital-analógico, uma tensão que realimenta a fonte de corrente para as pastilhas. Como a fonte aceita o controle por sinal analógico, tem-se o resultado termostático sem chaveamento ou intermitência, características dos termostatos convencionais.

A Eq. (2) refere-se apenas ao fluxo de calor por efeito de radiação. Na camada de ar há condução de ar e no apoio de PVC, que toca na amostra, também haverá algum fluxo de calor, o qual há de se considerar. No equilíbrio térmico:

$$Q_R = V.I - K(T_2 - T_1) \quad (3)$$

onde  $Q_R$  está dado pela Eq.(2),  $V$  e  $I$  são respectivamente a tensão e a corrente aplicadas sobre o resistor da placa quente,  $K$  é a condutância não desejada dos elementos do calorímetro. O valor de  $K$ , estimado teoricamente, deve ser maior que  $0,05 \text{ W/}^\circ\text{C}$ . A partir de um bom número de medidas com superfícies de emissividade conhecida, atribuiu-se o valor de  $0,103 \text{ W/}^\circ\text{C}$  a  $K$  por representar a média dos valores que ajustaram os ensaios.

A Fig. 5 mostra um esquema da montagem do calorímetro, exibindo 3 fontes de potência elétrica, uma para aquecer a placa quente, uma para refrigerar a mesa de alumínio e outra para aquecer a blindagem térmica. Além das fontes há dois multímetros para medir, respectivamente, a tensão e a corrente aplicadas na placa quente e a unidade de aquisição de dados que também opera como conversor D/A, comandado pelo computador.

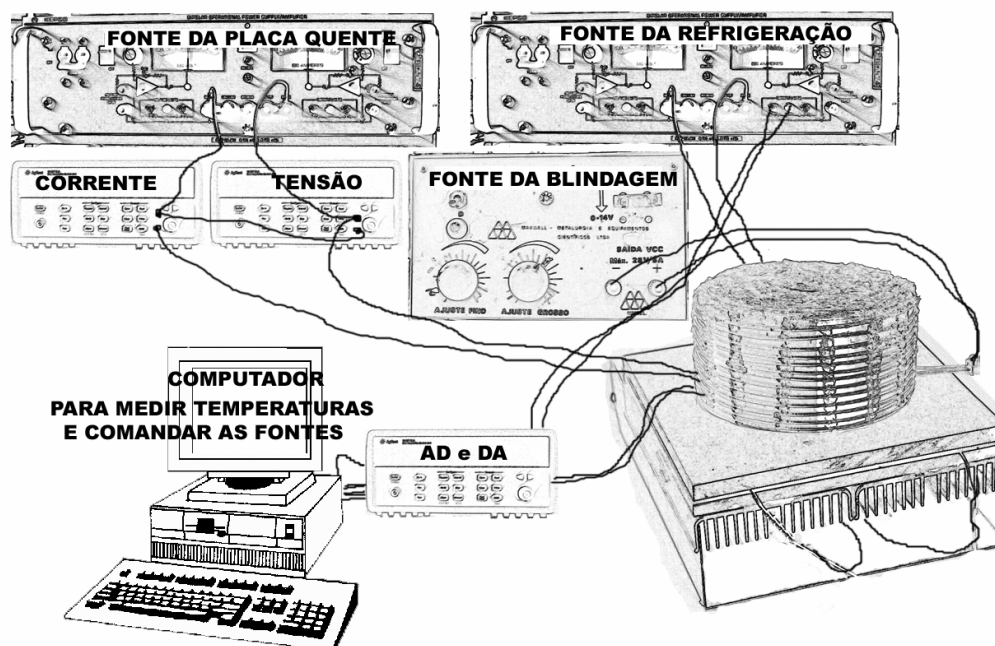


Figura 5. Esquema da interconexão da instrumentação utilizada.

### 3. Erros e incertezas

Como todo instrumento, o calorímetro construído está sujeito a erros porque os componentes que o constituem não são ideais e porque os conceitos de sua hipótese de funcionamento não se cumprem de forma ideal. Está também sujeito à limitações de precisão e exatidão nas medidas de temperatura, tensão e corrente. A combinação dos erros que não podem ser estimados para introduzir sua correção leva à incerteza na determinação da emissividade, a qual não é constante, pois depende da própria emissividade da amostra e das condições térmicas em que o ensaio foi realizado. A seguir são analisados alguns fatores que causam erros no resultado e é apresentada uma estimativa da incerteza que os mesmos acarretam.

#### 3.1 Fluxo de calor não é unidimensional

O fluxo de calor deveria ocorrer apenas da placa quente para a amostra, na direção normal à superfície das duas. Se houver gradientes de temperatura no entorno da placa quente, isto é, se a blindagem térmica não estiver exatamente na mesma temperatura que a placa quente, parte da potência elétrica será dissipada em outras direções. O controle de temperatura assegura que a blindagem tem menos de 1°C de diferença da placa quente e o isolamento de poliuretano entre os dois elementos permite estimar que o fluxo de calor para cima e para os lados não é maior que 30 mW.

#### 3.2 Precisão na temperatura da placa quente

A temperatura da placa quente é medida através de um termopar tipo T inserido dentro do disco de alumínio para que sua junção estivesse próxima à superfície. A exatidão das temperaturas nestes ensaios é menos importante que sua precisão, isto é, se todos os sensores de temperatura indicam sempre um valor de temperatura com um erro sistemático de 1°C este erro pouco se reflete no resultado, mas a diferença entre os sensores ou a falta de repetibilidade nas medidas pode ser bastante prejudicial. A medição de temperatura com o termopar é realizada com compensação interna no instrumento de leitura e tem uma incerteza de  $\pm 0,3^\circ\text{C}$ .

#### 3.3 Precisão na temperatura da mesa refrigerada.

Como no caso da temperatura da placa quente, a mesa refrigerada tem um termopar inserido dentro da placa superior e com cerca de dez centímetros de comprimento também embutidos na placa, para diminuir erros por condução de calor nos fios do mesmo. O termopar utilizado é medido com compensação interna no instrumento de leitura e tem uma incerteza de  $\pm 0,3^\circ\text{C}$ .

### 3.4 Precisão na temperatura da amostra.

Infelizmente não é possível preparar todos os tipos de amostras com um termopar embutido e não é verdadeiro presumir que a amostra tenha a mesma temperatura da mesa, a menos que seja uma fina camada aderida à própria mesa. Para determinar a temperatura da amostra, é realizado um estudo em cada situação. Sabe-se que o valor será próximo ao da temperatura da mesa. Sabendo-se a temperatura em uma das faces da amostra e sua condutividade térmica é fácil avaliar a temperatura da face exposta, já que o fluxo de calor é unidirecional e medido. Para algumas amostras será necessário repetir a experiência várias vezes com termopares na superfície exposta para avaliar a relação entre a temperatura da mesa refrigerada com a da superfície, ou ainda estudar a amostra com termômetro sem contato, erguendo o cilindro aquecido por alguns segundos, sendo neste caso, necessário fazer uma iteração com os valores presumidos da emissividade.

Na suposição de que estas preliminares tenham sido realizadas, não há motivos para estimar mais erro na temperatura da amostra do que os da temperatura da mesa refrigerada, considerando então também uma incerteza de  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ .

### 3.5 Precisão na determinação da potência de aquecimento.

Os instrumentos utilizados na medição da corrente e da tensão são de alta precisão e a fonte de tensão utilizada garante a constância da potência aplicada. A inexatidão instrumental é 0,005% na tensão e 0,1% da leitura na corrente, predominando esta última, evidentemente. O valor da potência varia para cada experimento, porém é estabelecido em torno de 4W, sendo a incerteza, neste caso, de 4 mW. Como foi visto no item 3.1, o erro por fluxo de calor em direção não desejada pode ser da ordem de 30 mW, muito maior, portanto, que a inexatidão instrumental.

### 3.6 Efeitos dos erros sobre o valor da emissividade.

A simples aplicação das equações apresentadas permite fazer estimativas dos efeitos que diferentes erros podem causar sobre os valores de emissividade medida. Para ajudar a visualizar esta dependência são apresentados os gráficos das Figs. 6 e 7. A Fig. 6 mostra como varia o valor da emissividade resultante do ensaio com o erro nas temperaturas das placas. As curvas verde e azul correspondem à temperatura da placa quente ( $T_2$ ) para amostras com emissividade respectivamente de 0,95 e 0,1. Observa-se como com amostras de maior emissividade um erro na determinação da temperatura da placa é menos prejudicial. Efeito similar é observado para erros na temperatura da amostra que correspondem às curvas vermelha e preta para emissividades, respectivamente, de 0,95 e 0,1.

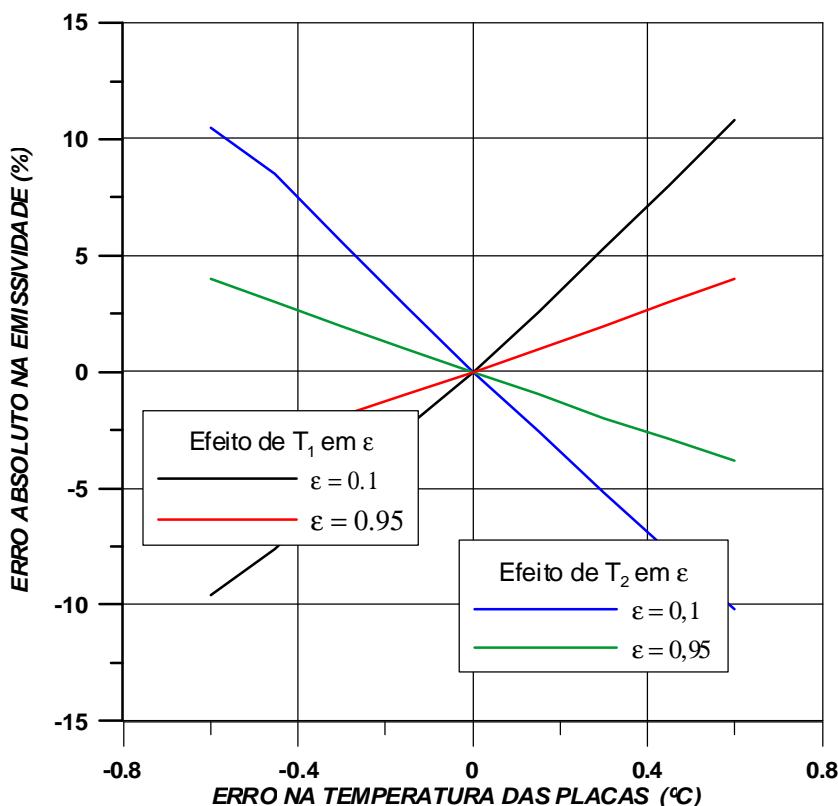


Figura 6. Erro na determinação da emissividade em função do erro na determinação da temperatura para a placa quente ( $T_2$ ) e para a amostra ( $T_1$ ) para emissividades de 0,1 e 0,95

A Fig. 7 mostra a temperatura de estabilização da placa quente para uma amostra em temperatura fixa de 20°C, em função da emissividade da amostra. As três curvas, azul, verde e vermelha, representam os casos em que a potência aplicada foi, respectivamente, de 3W, 4W e 5 W. A partir destes gráficos é possível observar a sensibilidade que o sistema tem à temperatura de operação e, indiretamente, o erro causado por não conhecer a temperatura com exatidão.

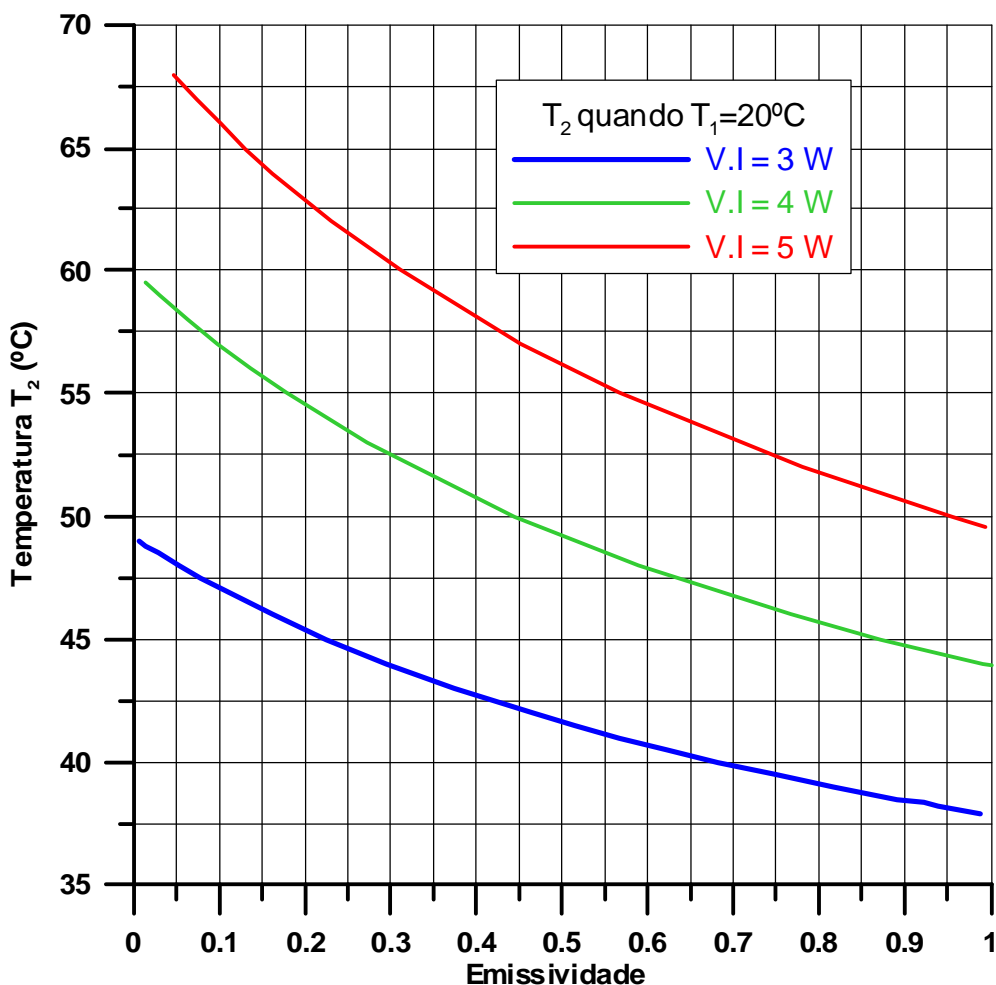


Figura 7. Temperatura de equilíbrio para a placa quente quando a amostra tem 20 °C, em função da emissividade da amostra, para 3 potências.

#### 4. Resultados e Conclusões

O instrumento construído é capaz de determinar o valor da emissividade de diversas superfícies para temperaturas próximas da temperatura ambiente. Somente porque a instrumentação é de muito boa qualidade é possível fazer medições deste tipo com resultados de confiabilidade. Foram medidos alguns materiais cujos valores esperados de emissividade se encontram em tabelas em publicações de uso na engenharia. A Tab. 1 mostra os valores medidos em dois ensaios diferentes para cada amostra. Pode-se notar que os dados não se repetem, apesar de estarem dentro das incertezas previstas. Possivelmente repetindo as experiências várias vezes e fazendo uso de tratamentos estatísticos seria possível obter melhores resultados.

Tabela 1. Resultados experimentais da emissividade determinada com o calorímetro e valores tabelados.

Material	Ensaio	Valor medido	Valor Tabelado
Aço inox polido	1	0,10	0,11
	2	0,14	
Alumínio sem polimento	1	0,05	0,07
	2	0,08	
Vidro comum	1	0,97	0,94
	2	0,95	

## 5. Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com financiamento do CNPq. O autor agradece a participação dos acadêmicos Alison dal Bosco e Fernando Kehl, bolsistas de Iniciação Científica que colaboraram na montagem do sistema.

## 6. Referências

- Dey, C. J., Read, A. J. Collins, R. E. e Brunotte, M. 1998, "A Guarded Cold Plate Apparatus for Absolute Measurement of Heat Flow". *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, pp 3099-3108.
- Jaworske, D. A. 1994, "Emittance Characterization of Thermal Control Paints, Coatings and Surfaces using a Calorimetric Technique. *Thin Solid Films*, Vol 253, pp 233-237.
- Krenzinger, A. 1979. Superfícies Seletivas para Conversão Térmica da Energia Solar-Oxidos de Cobre sobre Cobre. Dissertação de Mestrado, PPGEM, UFRGS, Porto Alegre.
- Zhangl, Q. C., Simko, T. M., Dey, C. J., Collins, R. E., Turner, G. M., Brunotte, M. and Gombert, A. 1996, "The Measurement and Calculation of Radiative Heat Transfer Between Uncoated and Doped Tin Oxide Coated Glass Surfaces". *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.40, pp 61-71.

### DEVELOPMENT OF AN APPARATUS FOR DETERMINING SURFACE EMISSIVITY

Arno Krenzinger

PROMEC, Universidade do Rio Grande do Sul, Rua Sarmento Leite, 425, 90050-170 Porto Alegre-RS

arno@mecanica.ufrgs.br

#### Abstract

This work presents the methodology employed to measure the emissivity of surfaces through a calorimeter manufactured in the Solar Energy Laboratory at UFRGS. The calorimeter measures the heat flux between two parallel and horizontal surfaces, where the upper surface is heated by a high stability electric current source. The temperatures of both surfaces are determined when the system reach the thermal equilibrium. The heated surface is protected by a thermal guard, which makes all the electrical power to be dissipated towards the inferior surface that is cooled by a Peltier system. The heat flux is measured and its value is used in an equation where the emissivity of both surfaces are important. The apparatus parameters were determined from some experiments with known emissivity surfaces and it is now suitable for measuring the emissivity of surfaces with unknown optical properties. The work also analyzes the experimental intrinsic errors of the apparatus.

Keywords: emissivity, hemispherical emittance, calorimeter, hot guard