MEDIDA CALOMÉTRICA DA ABSORVIDADE SOLAR NORMAL MÉDIA DE SUPERFÍCIES AO AR COM AUXÍLIO DE UM SIMULADOR SOLAR

LUIZ ANTONIO WAACK BAMBACE
Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12201 - São José dos Campos, SP

RESUMO

Este trabalho apresenta um método de medida da absortividade solar normal média, onde obtém-se esta propriedade a partir da razão de potência elétrica necessária para reequilibrar o sistema em uma temperatura idêntica a obtida iluminando-se o mesmo com um simulador solar. Um modelo teórico simples permite atenuar os erros devido as resistências térmicas internas da montagem e da amostra, garantindo precisões satisfatórias mesmo que as propriedades térmicas da amostra não sejam exatamente conhecidas.

INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é descrever um método calorimétrico de medida da absortividade solar normal média (α), definida como a fração da energia luminosa que incide perpendicularmente a uma amostra, com composição espectral idêntica a luz solar num dado ambiente, que é absorvida por esta amostra. O presente método foi desenvolvido para medir ao ar livre esta propriedade e para ser empregado no controle das tintas e demais revestimentos a serem empregados no sistema de controle térmico do satélite de Coleta de Dados I, usando apenas facilidades já existentes no Instituto de Pesquisas Espaciais.

Duas são as classes de métodos para esta medida; os óticos e os calorimétricos. De acordo com a literatura [1 a 4], o método mais preciso é o clássico método ótico no qual se ilumina a amostra, colocada dentro de uma esfera integradora e se analisa a radiação refletida com um monocromador e um fotodetetor. Este sistema permite obter-se a absortividade com erros de 2 a 5%, conforme a qualidade da instrumentação, método de calibração e faixa do valor desta propriedade. Métodos óticos que não utilizam todos estes instrumentos geralmente são calibrados contra o método anterior, destacando-se dentre estes a técnica que usa apenas um fotodetetor plano, uma esfera integradora tipo Ulbricht e uma fonte com espectro próximo ao do Sol. Finalmente, os métodos calorimétricos já existentes na literatura foram concebidos para trabalhar em vácuo (10^{-4}Pa) em câmaras com paredes criogênicas. Métodos calorimétricos são em geral mais precisos que os óticos que não utilizam monocromador pela ausência do erro associado a mudança de resposta do fotodetetor com o comprimento de onda, e a amplificação do sinal. Os custos associados tanto a operação como aos equipamentos exigidos tem sido até aqui a maior restrição ao uso de tais métodos. Medir ao ar livre calorimétricamente é altamente interessante quando já se dispõe de um simulador solar, pois neste caso não há investimentos em equipamentos, as medidas são realizadas rapidamente e a baixo custo operacional.

Com o método proposto, pode-se medir com precisão suficiente a absortividade solar normal média.

FUNDAMENTOS DO MÉTODO DE MEDIDA

O método de medida aqui proposto baseia-se no fato de que em conjuntos com baixo número de Biot, a posição real onde o calor é gerado pouco afeta a temperatura do meio. Em decorrência disto em um conjunto com esta característica poderia-se gerar calor com um resistor elétrico de modo a equilibrar a temperatura do conjunto em valores iguais aqueles nos quais o sistema se equilibra quando iluminado pelo simulador solar. Sabendo-se qual a quantidade de energia iluminosa incidente na amostra ter-se-ia a absortividade como a razão da potência elétrica pela luminosa. Contudo mesmo com os valores de Biot mais baixos obtíveis, limitado pela resistência térmica de contato, há um erro residual que pode ser corrigido pelo modelamento do arranjo experimental. Erros relativos de até 20% nesta correção não representam mais de 1,5% no resultado final, em virtude da faixa de Biot das montagens experimentais. Mesmo somando-se a este erro aqueles devidos a instrumentação empregada, obtém-se em decorrência disto erros finais relativamente baixos.

Conforme já citado a absortividade será obtida por:

$$\alpha = \frac{Pab}{I.S} \cong \frac{Pel.f}{I.S} \qquad (1)$$

onde: I é a intensidade do fluxo luminoso, S é a área da amostra, Pab é a potência luminosa absorvida pela amostra, Pel é a potência elétrica gerada e f é o fator de correção.

O arranjo relativo entre sensor, amostra e base do aparelho, bem como um esquema do modelo térmico adotado são apresentados na Figura 1.

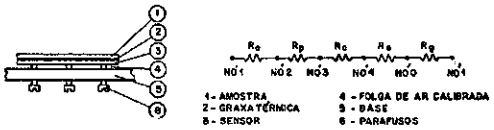

Figura 1 - Arranjo sensor base amostra e seu modelo térmico.

Da Figura 1, pode-se obter as resistências térmicas equivalentes entre os nós 2 e 5 e o nó 1 (ar), respectivamente R_{2-1} e R_{5-1}, bem como a temperatura do nó 3 para geração de calor nos nós 2 e 5, T_{3-2} e T_{3-5}, como se segue:

$$R_{2-1} = (S-R_o)R_o/S \qquad (2)$$
$$R_{5-1} = (S-R_g)R_g/S \qquad (3)$$
$$T_{3-2} = q_2 R_{2-1}(R_g + R_s)/(S-R_o) \qquad (4)$$
$$T_{3-5} = q_5 R_{5-1}(R_o + R_p + R_c)/(S-R_g) \qquad (5)$$
$$S = R_o + R_p + R_c + R_g + R_s \qquad (6)$$

Forçando-se T_{3-2} e T_{3-5} serem iguais:

$$q_5/q_2 = \frac{R_o}{R_g}\,\frac{(R_g + R_s)}{(R_p + R_o + R_c)} = \frac{(1 + h_g.\delta s/ks)}{(1+h_o/h_c+\delta.p.h_o/kp)} \qquad (7)$$

onde: hg e ho são os coeficientes de troca de calor por convecção entre o ar e o conjunto pelo topo e pela folga, δs, δp, ks e kt respectivamente as espessuras do sensor e da amostra e as respectivas condutividades térmicas, e hc é o coeficiente de troca de calor por contato.

Da expressão 7, observa-se que para somas de resistências da peça, sensor e contato muito menores que Rg e Ro, Biot baixo, tem-se da imposição de igualdade de temperaturas que q_2 tende a q_5. Do mesmo modo quando existe propotcionalidade entre Rg e Ro, e Rs + Rg e a soma de Rp, Ro e Rc o erro é nulo.

A condutibilidade térmica do ar e sua viscosidade dinâmicas podem ser obtidas por:

$$k_{ar} = 2,6464 \times 10^{-3}\ T^{1.5}/[T + 245,5 \times 10^{-(12/T)}] \qquad (8)$$

$$u_{ar} = 1,458 \times 10^{-8}\ T^{1.5}/(T + 110,4) \qquad (9)$$

onde: T é a temperatura média em Kelvin entre o ar e o conjunto sensor amostra.

Para cálculo de h_o usou-se a fórmula de MacAdams:

$$h_o * L\ k_{ar}^{-1} = a\ (Gr\ Pr)^n \qquad (10)$$

onde: Gr e Pr são os numeroa de Grashoff e Prandt, a e n são respectivamente 0,54 e 0,25 para regime laminar e 0,14 e 1/3 para regime turbulento (Gr*Pr $< 2 \times 10^{-5}$.

Para cálculo do coeficiente de troca de calor pela folga de ar usa-se outra fórmula de MacAdams:

$$hg\ \delta\ k_{ar}^{-1} = a(Gr\ \delta\ Pr)^n \qquad (11)$$

onde: δ é a folga, a e n 0,195 e 0,25 para regime laminar ($10^4 < Pr.Gr < 4\ 10^5$), 0,068 e 1/3 para regime turbulento, calculando-se hg considerando - se apenas condução pelo ar quando Gr.Pr é o menor que 10^4.

Aos valores de h_o e h_c calculados por 10 e 4, acrescenta-se a parcela devido a radiação, $\sigma\varepsilon_a(T_3^2 + Tamb^2)$ (Tamb + Tsensor), e δG_f. (Ts^2 + $Tamb^2$) (Tamb + Tsensor) para ho e hg respectivamente, onde Gf é o fator de acoplamento de Gebhart com o meio e σ a constante de Boltzman

Montagem experimental e resultados. O sensor apresentado na Figura 1, foi feito com uma chapa de laminado fibra de vidro-epoxi FR4 (60% fibra de vidro) da Perstorp, de 1 mm de espessura. Este laminado quando não processado tinha de cada lado uma folha de cobre de 18μm, por processo fotográfico formou-se uma trilha composta de 165 barras de cobre remanecente de 136μm de largura, espaçadas de 136μm, e ligadas em série. Expondo a placa a uma atmosfera fracamente corrosiva com monitoração de sua resistência esta foi ajustada para 100Ω a 25°C. Na outra face da placa formou-se por processo fotográfico um outro resistor análogo, formado porém por 83 barras de 270μm espaçadas de outros 270μm, também ligadas em série mas giradas de 90° em relação as barras da outra face. Este segundo resistor foi feito com 25Ω. Estes resistores receberam tão logo ajustadas suas resistências uma pintura acrílica isolante.

Em cada um dos 4 cantos do sensor foram soldados pinos de aço de 0,25mm de diâmetro, soldados após esta nhagem em furos metalizados. Estes pinos tinham duas funções: contato elétrico e referências de posicionamento do sensor. Como fêmea dos contatos elétricos usou-se contatos dourados para chips de computador.

Três parafusos de teflon M3, foram usados para controle da folga de ar entre o sensor e a placa terra térmico. Uma chapa de alumínio de 3mm de espessura, sob a qual se formou um fluxo de ar com o auxílio de um ventilador, foi usada como suporte.

Uma coluna encaixada a base, feita com chapas e tubos de PVC, serviu de suporte ao colimador ao mesmo tempo que evitou a existência de correntes de ar no sensor. Na montagem empregada forçou-se o maior desacoplamento possível entre o colimador e a base.

O resistor do sensor foi ligado a outro resistor idêntico colado a base e a dois potenciômetros de carbono como mostra a Figura 2. A ponte assim executada mostrou excelente sensibilidade, dado o elevado coeficiente de temperatura do cobre ($3,93 \times 10^{-3}\ °C^{-1}$).

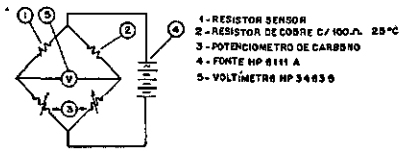

Figura 2 - Ponte de Wheastone.

A ponte usada tem a propriedade de dar um sinal dependente da diferença de temperatura entre o sensor e o ambiente. A temperatura do ambiente foi medida com um termômetro de platina.

O arranjo experimental usado é apresentado na Figura 3, sendo a ponte de Wheastone (Figura 2) zerada a cada medida.

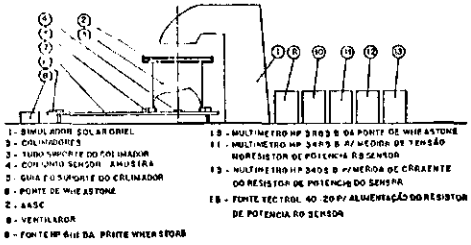

Figura 3 - Arranjo Experimental

Com o auxílio de resistores elétricos com geração de calor praticamente uniforme, calibrou-se o aparelho.

O primeiro destes resistores era uma chapa de alumina de 50x50x0,5mm com uma camada de nitreto de tantalo e duas faixas de ouro de 1mm de largura em duas laterais (contatos). Dado que para peças metálicas a resistência de contato Rc é muito maior que a da peça Rp, peças como esta, pintadas de branco, preto ou pintadas com verniz isolante e metalizadas foram usadas para representar as peças de um extremo do intervalo de utilização do aparelho.

Para representar-se o outro extremo usou-se chapas de circuito impresso FR4 de 1,6mm de espessura, onde se formou um resistor de 25Ω, igual ao resistor de mesmo valor do sensor. Da mesma forma tais peças receberam pintura branca e negra e metalização sobre verniz isolante.

Para acoplar termicamente o sensor as amostras usou-se glicerina loira (k = 0,206 W/m/°C).

Regulou-se a folga para 1,1mm com o intuito de ter-se idênticos erros para amostras com propriedades nos dois limites do intervalo útil do aparelho. Para esta folga o fator Gebhart Gf vale 0,0813.

Três operadores diferentes, realizaram medidas de q_2/q_5 para iguais sinais da ponte, tendo cada operador executado 6 medidas com cada padrão, em quatro diferentes níveis padronizados de potência aplicada (-9V, 7,5V, 5V, 3,5V).

Com base nestas 126 medições, obteve-se valores de h_c, k_s/b_s, δ_{ar} conforme a Tabela 1. Tais valores ajustados de propriedades levaram a erros totais inferiores a 2,7% para todos os pontos. Os maiores erros foram justamente para os pontos de menor nível de potência, devido a resolução do voltímetro. O valor de h_c, engloba a glicerina e a pintura do sensor.

Tabela 1 - Valores Experimentais de Alguns Parâmetros

PARÂMETRO	VALOR	UNIDADE
h_c	968	$W/m^2/^oC$
k_s/b_s	429	$W/m/^oC$
b_{ar}	1.13	m

Executada esta calibração, testou-se com o uso direto do simulador solar, 6 amostras de alumínio pintadas com a tinta negra Chemglaze Z306 e o primer AP131 sobre o alumínio decapado, 6 amostras de alumínio decapado pintadas com a mesma tinta mas com o primer BR127 da Cynamid, e seis amostras pintadas com o primer AP131 e a tinta Chemglaze Z306 sobre Alodine 1200, 18 amostras, 6 com cada uma das preparações já citadas foram pintadas com a tinta Z202 (branca).

A Tabela 2 apresenta os resultados desta medidas.

Tabela 2 - Resultados da Medida de Absortividade em Amostras Pintadas

AMOSTRA	MÍNIMO α	MÁXIMO α	MÉDIA DE α	DESVIO PADRÃO	FAIXA DE SELEÇÃO DO FABRICANTE
decap + AP131 + Z306	0,941	0,958	0,948	0,008	0,92 a 0,97
decap + BR127 + Z306	0,948	0,961	0,953	0,007	0,92 a 0,97
Alod 1200 + AP131 + Z306	0,949	0,954	0,952	0,000	0,92 a 0,97
decap + AP131 + Z202	0,242	0,251	0,246	0,005	0,21 a 0,27
decap + BR127 + Z202	0,236	0,242	0,239	0,003	0,23 a 0,27
Alod 1200 + AP131 + Z202	0,238	0,246	0,241	0,006	0,23 a 0,27

- Absorvidade solar média.

Duas de cada uma destas amostras foram submetidas a 300 ciclos de -60°C a 80°C em vácuo medindo-se novamente as propriedades de todas estas amostras. Notou-se como mostra a Tabela 3, sensível alteração nas amostras pintadas com tinta negra e preparação diferente da usualmente normalizada para esta tinta: primer AP131 sobre alumínio decapado. Para as tintas brancas não houve alteração sensível de resultados. No caso das peças com Alodine 1200, acredita-se que houve oxidação do pigmento das tintas negras (negro de fumo) pelo cromo hexavalente presente no alodine. Para a tinta branca, as normas normalmente permitem a pintura sobre Alodine, o que reforça esta idéia.

Tabela 3 - Valores das Propriedades Óticas após Ciclagem.

AMOSTRA	αmin	αmáx
decap + AP131 + Z306	0,92	0,94
decap + BR127 + Z306	0,75	0,78
Alod 1200 + AP131 + Z306	0,85	0,88
decap + AP131 + Z202	0,24	0,25
decap + BR127 + Z202	0,235	0,24
Alod 1200 + AP131 + Z202	0,235	0,24

A Tabela 4 mostra a contribuição relativa de algumas fontes de erro.

Tabela 4 - Fontes de Erro

TIPO DE FONTE DE ERRO	ERRO TÍPICO	CONTRIBUIÇÃO NO ERRO PARA α = 0,15	CONTRIBUIÇÃO NO ERRO PARA α = 0,95
Ruído na ponte	0,1mV	0,54%	0,08%
Erro de estabilização da ponte	0,4mV	2,16%	0,32%
Erro da calibração (levantamento de R_s, k_s, h_c, b_{ar}		2,7%	2,7 %
Efeitos de 2ª ordem na ponte devido a mudança no ambiente		1,06%	1,06%
Variações da resistência térmica de contato amostras metálicas	0,05mm na folga	0,21%	0,36%
Estimativa de propriedades de amostras plásticas	>5% k/b	0,37%	0,60%
Flutuações de potência iluminação incidente	6,78W/m²	0,50%	0,50%
Ajuste do nível de iluminação do simulador	1,94W/m²	1,0%	0,14%
Erro no cálculo de b_{ar} e k_{ar} devido ao erro de cal. ponte		0,2%	0,6%

Deve-se notar que o simulador solar da Oriel, tinha controle de nível de luminação em malha fechada, para os níveis de iluminação ajustados no dial, aferido com uma célula padrão. A máxima variação entre a temperatura ambiente e a de referência (zeragem da ponte) considerada foi de 2,5, devido a existência da ar condicionado na sala. O erro inerente as fórmulas de Mac Adams, foi absorvido através do ajuste dos parâmetros por mínimos quadrados. Aos erros da Tabela 4, deve-se acrescentar o devido a pequenas diferenças de espectro entre o simulador e o espectro real do Sol. Notar que o erro de calibração de 2,7% da Tabela 4, refere-se ao máximo erro observado na calibração elétrica, e assim já englobа o erro devido a ruído e estabilização da ponte, bem como efeitos de 2ª ordem no sinal da ponte devido a mudança de temperatura da sala, e variações de resistência térmica de contato e erros tendenciosos do modelo.

O erro total, excetuado o devido ao espectro, é da ordem de 2,8% para amostras de alta absortividade e 0,03 para a amostras de baixa absortividade.

A constante de tempo do sistema varia de 2 a 4 minutos dependendo da amostra. A redução da espessura da chapa de circuito impresso parece interessante do ponto de vista da constante de tempo. Tanto a redução de espessura de placa de circuito impresso como o aumento da folga, não diminuirão sensivelmente a diferença entre q_2/q_s máximo e mínimo relativos aos vários tipos de peça.

CONCLUSÕES

O método proposto pode ser considerado eficaz para a medida da absortividade normal solar média de revestimentos termo-óticos, em vista da sua excelente repetibilidade e precisão, já que os únicos erros não tratados no capítulo anterior foram a equivalência espectral da luz do Sol e do simulador e as eventuais oscilações de potência deste aparelho. As oscilações de potência do simulador solar foram levantadas pelo pessoal de desenvolvimento de células solares e ficaram abaixo de 0,5%. O erro devido ao expectro é pequeno segundo os dados do fabricante, e pouco relevante para amostras de propriedades óticas pouco dependentes do comprimento de onda. A maior dificuldade encontrada foi o ajuste manual do nível de potência elétrica que levava a igualdade de sinais da ponte, que resultou numa repetibilidade de 1,2%. Futuramente em decorrência disto, poderá se adotar algum tipo de controle automático. Além disto o método se mostrou útil na detecção de alterações de propriedades óticas. Futuramente, espera-se reduzir pela metade da espessura da placa de circuito impresso para diminuir a constante de tempo e reduzir o valor das correções. O aumento da folga muito mais promissora quanto ao aspecto Biot, esbarra no problema do aumento da constante de tempo.

REFERÊNCIAS

[1] Dunkle, R.V.; Edwards, D.K.; Gier, J.T.; Devans, J. T. Solar Reflectance Integrating Sphere, 1963.

[2] Fussel, W.B.; Triolo, S.S.; Henninger, J.H. A Dinamic thermal vacuum thecnique for mearuring the solar absortance and thermal emittance of spacecraft coating. NASA TND 1716, March 1963.

[3] Gordon, G.D. "Measurement of ratio of absortivity of Sun light to thermal emissivity". Rev. Sci. instr. 31 1204 (1960).

[4] Jacquez, J.A.; Kuppenheim "Theory of the integrating sphere". Journal Optical Soc. America 45(6):460-470, June 1955.

[5] 1976 U.S. Standard Atmosphere.

[6] Kreith, F. Principios de Transmissão de Calor. Edgard Blucher, 1977.

ABSTRACT

This work presents a new method for measuring the solar normal absortivity. This method is based in the fact that for low Biot numbers, by changing the heat source from the light to a electrical resistor, adjusting the power of the latter to achieve the same temperature level, the absortivity can be obtained as the ratio of eletrical power dissipated and the incoming light flux. To account the limitations for the Biot number, a correction is calculated to assure greater accuracy.