

1. Publicação nº <i>INPE-3530-PRE/751</i>	2. Versão	3. Data <i>Maio, 1985</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DMC/DEC</i>	Programa <i>ESTER</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>ABSORTIVIDADE SOLAR NORMAL MÉDIA</i> <i>COLORIMETRIA</i>			
7. C.D.U.: <i>536.6</i>			
8. Título <i>MEDIÇÃO CALORIMÉTRICA DE ABSORTIVIDADE NORMAL SOLAR MÉDIA COM O SIMULADOR SOLAR</i>		10. Páginas: <i>4</i>	
		11. Última página: <i>3</i>	
		12. Revisada por  <i>Humberto P. Cardoso</i>	
9. Autoria <i>Luis Antonio Waack Bambace</i>		13. Autorizada por  <i>Marco Antonio Raupp</i> Diretor Geral	
Assinatura responsável 			
14. Resumo/Notas <i>Este trabalho apresenta um novo método de medida da absortividade solar normal média. Este valor é obtido através da razão entre o fluxo incidente sobre a amostra, proveniente de um simulador solar, e o dissipado por um resistor elétrico, fixado abaixo da amostra, quando se ajusta a potência para obter a mesma temperatura de equilíbrio. Varias configurações são analisadas, selecionando-se a que apresenta menor erro e menor constante de tempo.</i>			
15. Observações <i>Trabalho a ser apresentado no VIIIº Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, São José dos Campos, 10-13 de Dezembro de 1985, ITA/CTA</i>			

SUMÁRIO

Este trabalho apresenta um novo método de medida da absorptividade solar normal média. Este valor é obtido através da razão entre o fluxo incidente sobre a amostra, proveniente de um simulador solar, e o dissipado por um resistor elétrico, fixado abaixo da amostra, quando se ajusta a potência para obter a mesma temperatura de equilíbrio. Várias configurações são analisadas, selecionando-se a que apresenta menor erro e menor constante de tempo.

INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é descrever um método calorimétrico de medida de absorptividade solar normal média, definida como a fração da energia luminosa que incide perpendicularmente numa amostra, com composição espectral idêntica à da luz solar fora da atmosfera, que é absorvida por esta amostra. O método foi desenvolvido para medir esta propriedade nas tintas e revestimentos a serem empregados no controle térmico de satélites, ao ar livre, usando ao máximo facilidades já existentes no Instituto de Pesquisas Espaciais.

Dois 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 fotodetector. Os erros de medida vão de 2 a 5%, neste caso, conforme a qualidade do equipamento e a faixa de absorptividade medida. Afora os métodos análogos a este, onde se altera a posição dos equipamentos, os demais métodos óticos dependem de uma calibração feita com este método, destacando-se aquele em que se usa um simulador solar, uma hemi-esfera integradora e um fotodetector (absortímetro portátil). Finalmente, os métodos calorimétricos já existentes foram todos concebidos para medição em câmaras vácuo-térmicas, com vácuos de 10^{-5} torr e paredes a temperatura criogênicas. As precisões típicas destes métodos são de 4 a 7%. Os custos de equipamentos são em geral elevados para os métodos óticos, enquanto os métodos calorimétricos têm um custo operacional muito alto, relativos a líquidos criogênicos, manutenção do equipamento de vácuo e duração muito grande das medidas. A medida calorimétrica ao ar livre é altamente interessante sob esta ótica, por aliar baixo custo operacional a um baixo investimento em equipamentos. O método proposto permite, já no seu estágio atual, medidas suficientemente confiáveis para que sejam usadas no projeto de controle térmico de satélites.

PROCESSO DE MEDIDA; MODELO MATEMÁTICO E ESCOLHA DA CONFIGURAÇÃO E MONTAGEM EXPERIMENTAL

A idéia do método é de que se tenha uma configuração onde as diferenças entre a quantidade de calor que deve ser gerada na amostra e aquela que deve ser gerada num resistor elétrico para obter uma determinada temperatura num sensor seja a mínima possível, para qualquer amostra com propriedades térmicas e óticas contidas numa certa faixa. Se estas diferenças forem pequenas, tem-se para a absorptividade que:

$$\alpha = \frac{P_{ab}}{I \cdot S} = \frac{P_{el}}{I \cdot S} \cdot k = \frac{P_{el}}{I \cdot S} \quad (1)$$

onde: I - é a intensidade do fluxo luminoso (potência/área); S - é a superfície da amostra; P_{ab} - é a potência absorvida pela amostra da radiação luminosa; P_{el} - é a potência elétrica dissipada; k - é a razão entre as potências absorvidas e elétrica que implica o mesmo nível de temperatura.

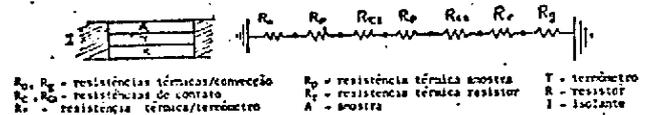


Figura 1 - Sistema Exemplo.

Analisando por exemplo a configuração da Figura 1, supondo que se gera calor no nó 2 ou no nó 5 e que se mede a temperatura do nó 3, tem-se que as resistências térmicas dos nós 1 e 5 para o ar e as temperaturas do nó 3 para a geração de calor no nó 1 ou 5, respectivamente R_{1-0} , R_{5-0} , T_{2-0} e T_{5-0} são dadas por:

$$R_{1-0} = \frac{(S-R_0)}{S} \cdot R_0, \quad (2)$$

$$R_{5-0} = \frac{(R_g+R_T)(S-R_g+R_T)}{S}, \quad (3)$$

onde: $S = R_0+R_p+R_T+R_{C1}+R_{C2}+R_g+R_t$,

$$T_{3-1} = q_1 \cdot R_{1-0} \left| 1 - \frac{(R_p + R_{C1})}{(S - R_0)} \right|, \quad (4)$$

$$t_{5-1} = q_2 \cdot R_{5-0} \left| 1 - \frac{(R_{C2} + R_t)}{(R - R_g - R_T)} \right|, \quad (5)$$

para R_g muito grande ter-se-ia:

$$\frac{q_5}{q_1} = 1 - \frac{R_{C1} + R_p}{(R_{C1} + R_p + R)} \quad (6)$$

e para forçar q_5 igual a q_1 e t_{3-1} igual a T_{5-1} dever-se-ia ter:

$$\frac{R_0}{R_g + R_r} = \frac{R_p + R_{c1}}{R_t + R_{c2}} \quad (7)$$

Pode-se observar que, para valores de resistências internas da peça também muito pequenas, q_5 tende a q_1 , para T_{3-5} igual a T_{3-1} . Vê-se pela Equação 7 que, dadas R_0 , R_{c1} e R_{c2} , existem sempre valores de R_g , R_r e R_t que implicam q_5 e q_1 iguais, quando T_{3-1} for igual a T_{3-5} . A possibilidade de controlar mais de um parâmetro permite não só forçar a igualdade das potências geradas, como também minimizar a sensibilidade da razão das potências com a variação dos parâmetros. Fazendo q_1 e q_5 iguais para uma amostra média, pode-se, caso se trabalhe com valores mínimos de sensibilidade, obter k próximo de um para todas as amostras da faixa. As amostras a serem medidas não têm restrições quanto à emissividade infravermelha e absorvidade solar normal média, devendo ter espessura e condutividade térmica do material tal que sua razão seja menor que $0,0052^\circ \text{Chm}^2/\text{kcal}$.

Sob este ponto de vista analisaram-se, para a escolha da configuração, seis alternativas além da escolhida, que correspondiam: a três placas (termômetro - amostra e resistor) montadas livremente no ar, na ordem apresentada na Figura 1 ou montadas diretamente numa cavidade num material isolante, ou montadas numa caixa de metal colocada numa cavidade de material isolante, ou outras três análogas a estas, com a omissão da placa termômetro e fixação de termopares à amostra.

Basicamente, os modelos desenvolvidos analisavam separadamente diversos efeitos e consideravam cada uma destas configurações como um conjunto de 2 a 16 nós isotérmicos. As resistências térmicas envolvidas foram calculadas com base nas dimensões dos componentes das faixas de variação das folgas, das propriedades dos materiais e das fórmulas de convecção de McAdams. Foram considerados os efeitos de variação dos coeficientes de película com a temperatura, distorção espacial da geração de calor (2% para geração pela absorção da luz e 3% para o resistor), resistência de contato termopar-amostra, modos de transmissão de calor pelos termopares, constantes de tempo, etc. No caso de fugas de calor pelas laterais de placa, foram usados sempre dois valores de resistência térmica, o primeiro que considerou apenas a troca de calor por convecção ou a resistência de contato, e o segundo que incluiu um valor limite para a resistência interna das placas. Para qualquer das configurações estudadas, pode-se limitar o efeito da distorção da distribuição bidimensional de temperatura no valor de k , considerando: todas as placas envolvidas como uma única placa que troca calor somente por convecção (pelas bordas e pelas faces); os coeficientes de troca de calor diversos para os casos de geração de calor pela luz ou pelo resistor; e as tolerâncias dimensionais das faixas sem geração de calor. No caso da configuração escolhida (Figura 2), o efeito é inferior a 0,3% no pior caso.

Os valores adotados para as resistências térmicas envolvidas encontram-se na Tabela 1.

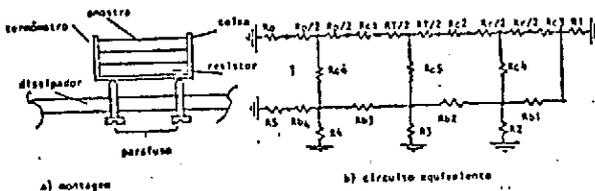


Figura 2 - Configuração final e circuito equivalente.

Tabela 1 . Resistência térmicas

Resistor	Mínimo *	Máximo *	Resistor	Mínimo	Máximo
R_0	32	104	R_{b1}	0,24	0,26
k_0	856	1000	R_{b2}	0,24	0,26
R_1	480	671	R_{b3}	0,43	0,45
R_2	262	340	R_{c1}	0,3229	0,64384
R_3	140	195	R_{c2}	0,95	1,166
R_{b4}	0,9	1,29	R_{c3}	0,05	0,15
R_p	0	2	R_{c4}	3	26
R_T	1,32	1,46	R_{c5}	3	25
R_r	0,01661	0,02325	R_{c6}	40	250

R_1 é variável em função da folga e espera-se, na face inferior, apenas condução de calor pelo ar. Nos valores mínimos de R_{c4} , R_{c5} e R_{c6} não estão incluídas as resistências internas.

Montagem experimental. A Figura 3 mostra o esquema da montagem experimental usada (de 1 a 7), e o conjunto especial (7) segue o esquema da própria Figura 2. Nesta montagem usou-se uma fonte de corrente HP6111A (1), uma fonte Tectrol TCA 40-20 (2), dois multímetros HP3465B (3), um termo-resistor de platina para medir a temperatura da sala (4), um simulador solar ORIEL (5), uma ponte de Wheastone com resistores com coeficiente de temperatura inferiores a $500/(1.000.000^\circ\text{C})$ (6), a qual será futuramente substituída por uma ponte com todos os elementos de cobre, do conjunto (7) formado de:

- um resistor de filme de nitreto de tântalo sobre uma chapa de $50 \times 50 \times 0,6$ mm de espessura de Al_2O_3 (USP -microeletrônica);
- um anteparo colimador formado de duas placas de alumínio polido, pintadas com Q15277 da Dow Corning, com furo retangular de 46×50 mm;
- uma caixa de $50,8 \times 50,8 \times 3,4$ mm, feita com fita de alumínio de $0,125$ mm de espessura da 3M do Brasil Ltda, colada ao conjunto placa resistora/termômetro;
- quatro parafusos M3 de Teflon com $10,5$ mm de comprimento;
- um termo-resistor com fio de cobre formado de 165 barras paralelas de $136\mu\text{m}$ de largura, distantes $136\mu\text{m}$ uma das outras, com uma resistência total de $92 \pm 94\Omega$, sobre placa de fibra de vidro/epoxi 60 - 40% da TERSTROP, uma área total de 2×2 polegadas, e uma zona sensível de 45×45 mm;
- uma chapa de alumínio de 350×350 mm x 3 mm, sobre a qual se cola um pedaço de espuma de polipropileno de $50 \times 60 \times 2$ mm;
- uma caixa de papelão para proteger o conjunto de correntes de ar.

O objetivo do resistor-sensor é reduzir a influência da distorção da distribuição espacial de potência gerada, aos níveis desprezíveis, qualquer que seja a natureza da amostra.

Usou-se a resina Sylgard RTV732 para colar o resistor de nitreto de tântalo no termômetro, com a face ativa do resistor e a face não-ativa do termômetro voltadas uma para a outra. Recomenda-se o uso de pasta térmica DC540 da Dow Corning para acoplar ao conjunto qualquer amostra que não seja de silicone ou produtos afins.

O principal objetivo da caixa de alumínio é reduzir as perdas por radiação e, paralelamente, as diferenças internas de temperatura devido à sua alta condutibilidade térmica.

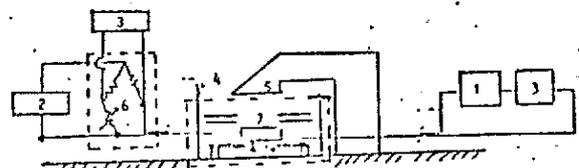


Figura 3 . Montagem experimental

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Devido à ausência de amostras com a absorptividade conhecida, desenvolveu-se um esquema de calibração em que se monta no lugar da amostra um resistor de filme de nitreto de tântalo, normal ou modificado, para apresentar propriedades que tornem o mais distante de um possível o valor de k definido na Equação 5. Tomaram-se 5 amostras, duas chapas de óxido de alumínio pintadas do lado não-ativo com a resina Sylgard RTV732 Dow Corning, com várias demãos, até se ter uma espessura total de 1,2 mm de resina, um resistor normal, um resistor com três folhas de cartolina coladas com cola de poliestireno (~ 30 Cxh/kcal de resistência térmica), um resistor normal com filme de Mylar aluminizado sobre ele e gruda do com óleo. Para cada amostra realizaram-se cinco séries de 5 medidas de k , para cada nível de tensão, medindo este parâmetro com pelo menos duas tensões diferentes. Após cada série a amostra era retirada, o conjunto e a amostra eram limpos com flanela da DC340 e reengraxados e montados.

Na primeira tentativa, não se mediu, para o resistor normal, nada próximo ao esperado, e ainda não se tinha a camada de espuma colada à chapa de alumínio; tinha-se 6 mm de folga entre a chapa e a caixa e provavelmente ocorreu convecção. Com a adição da espuma, colada à chapa com fita adesiva dos dois lados da 3M, e a distância de 6,7 mm entre o fundo da caixa porta-amostra e a chapa dissipadora chegou-se a um valor de k , próximo ao esperado para o resistor, iniciando assim a série de medidas já descritas.

Os resultados são mostrados na Tabela 2, onde se designa por 1 o resistor nu, por 2 e 3 resistores com silicone (2,4 a 2,60 Cxh/kcal), por 4 o resistor com papel (3-3,2 Cxh/kcal) e por 5 o resistor aluminizado. Nesta tabela resumem-se alguns resultados obtidos com outras folgas para os resistores 3 e 4.

Observou-se que para tensões superiores a 11 volts, aplicadas ao resistor de filme (50-54 Ω), houve reação entre o silicone de uma das amostras e a graxa DC340; daí o uso de papel, que também não permitiu atingir as temperaturas correspondentes às absorptividades maiores que 0,9.

Mediu-se a constante de tempo do sistema para cada uma das cinco amostras, que ficaram na faixa de 6 a 8 minutos.

Tabela 2. Resultados experimentais.

Potência	Resistor	Folga inferior	k médio	desvio padrão total	número k medido	número k rejeitado	desvio padrão relativo a rejeição de sistema de contato
0,50	1	6,7 mm	0,965	0,0095	0,982	0,957	0,0043
0,52	2	6,7 mm	0,973	0,0083	0,985	0,964	0,0051
0,66	3	6,3 mm	0,9614	0,021558	0,9807	0,9324	0,0045
1,52	3	6,3 mm	0,963	0,020	0,995	0,950	0,0030
1,5	4	6,3 mm	0,948	0,0018	0,961	0,932	0,0060
0,5	1	6,3 mm	1,0287	0,0108	1,0410	1,0201	0,0048
1,5	1	6,7 mm	1,0276	0,0086	1,0310	1,0210	0,0031
3,5	1	6,7 mm	1,0265	0,0069	1,0306	1,0223	0,0051
0,5	5	6,7 mm	0,978	0,021	1,00	0,910	0,008

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostram a viabilidade do método, uma vez que num programa de testes de revestimentos e tintas para satélites dificilmente ter-se-ão amostras com resistência térmica maior que 20 Cxh/kcal na direção perpendicular à placa, e que os erros de aparelhagens envolvidos são da ordem de 0,1 a 0,2% para a medida de potência, 0,1% para o sinal do voltímetro da ponte de Wheastone e 0,5% para o fluxo luminoso do simulador solar. Este fato implica erros globais na faixa de 4 a 5%, se forem considerados os efeitos de variação de temperatura da sala, falha do operador, critérios de estabilização, etc. Este erro já é bastante aceitável, com uma repetibilidade de 2% que pode ser considerada boa. Contudo, algumas medidas podem melhorar a montagem, como:

- uso de uma ponte de Wheastone com todos os elementos de cobre, tal qual o sensor para reduzir a influência da temperatura da sala;
- uso de chapa de fibra de vidro/epoxi de bitola 0,6mm para a fabricação do sensor;
- uso de um sensor de circuito impresso com dois lados ativos, calibrado, e termopares na caixa de alumínio para levantar dados suficientes para avaliar o modelo matemático, usando-o para corrigir os resultados;
- colagem mais cuidadosa do resistor no termômetro.

Sem dúvida, o efeito de variação da temperatura da sala é muito mais crítico que o da resistência de contato amostra conjunto, no tocante à repetibilidade, é o maior causador de erros de medida, sendo provável que a troca do material de ponte leve à repetibilidade para cerca de 0,7%. A aderência razoável com os valores mais prováveis dos parâmetros poderia permitir uma correção do resultado, com faixa de erro remanescente de 1 a 2% se a resistência de amostra e sua emissividade fossem bem conhecidas. Note-se que o erro remanescente é devido ao coeficiente de película, que é em geral não-conhecido.

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 Dynamic thermal vacuum technique for measuring the solar absorptance and thermal emittance of spacecraft coating. NASA TND 1716 March 1963.
- [3] Gordon, G.D. "Measurement of Ratio of Absorptivity 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.

SUMMARY

This work presents a new mean solar normal absorptivity measurement method. This value is obtained as the ratio between the sample incident flux, coming from a solar simulator, and the power dissipated by an electrical resistor, placed under the sample, when the power is adjusted to obtain the same equilibrium temperature. Several configurations are analysed and the minimum error and minimum time constant one is selected.