

MEDIÇÃO DE REFLETIVIDADES ESPECTRAIS USANDO UMA ESFERA DE INTEGRAÇÃO

Vicente de Paulo Nicolau

Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Catarina
vicente@emc.ufsc.br

Talita Sauter Possamai

Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Catarina
taboom_2@yahoo.com.br

Resumo. O artigo apresenta o método experimental para a obtenção de refletividades espectrais de superfícies opacas difusoras. Trata-se da refletividade normal-hemisférica, obtida através de uma esfera de integração, para a região visível e infravermelha próxima. A teoria concernente ao método de medição é detalhada. Resultados para diferentes superfícies são apresentados e discutidos.

Palavras chave: refletividade, esfera de integração, radiação térmica, medição de propriedades, revestimentos.

1. Introdução

A radiação solar tem grande influência sobre as trocas térmicas e deve ser considerada criteriosamente nos projetos de engenharia, uma vez que os ganhos de energia e de luminosidade estão relacionados com as propriedades do material construtivo. O conhecimento das propriedades radiativas de diferentes superfícies e materiais é de grande utilidade na orientação de projetos de construção civil e na aplicação a programas de simulação térmica, assim como para a indústria de tintas e materiais de revestimento.

A medição de propriedades radiativas ou ópticas, apresenta uma série de dificuldades, pois diferentes bancadas e componentes são necessários, conforme a variável a ser medida. Uma abordagem geral do problema é apresentada por Sacadura (1990). Algumas propriedades podem ser medidas de forma global, outras são medidas de forma espectral, fazendo-se a integração no espectro para se obter o valor global. A utilização da Lei de Kirchhoff pode ser feita em certos casos, mas de forma segura apenas para os valores espectrais no caso de superfícies difusoras, conforme Incropera e De Witt (2002).

A medição de uma dessas propriedades radiativas, a refletividade espectral normal-hemisférica de materiais difusores opacos, é possível através da utilização de uma esfera de integração. Uma esfera deste tipo pode ser adquirida no mercado externo, porém com custo elevado. Deseja-se nesse trabalho apresentar uma esfera de integração construída em fibra de vidro e com o revestimento interno branco, tipicamente usado na coloração da própria fibra e disponível no mercado. A esfera construída foi acoplada a uma bancada específica de radiação e testada de diversos modos, sendo os resultados das refletividades apresentados de forma gráfica em função do comprimento de onda, mostrando o comportamento de diferentes materiais.

2. Equipamentos e Componentes

A bancada, Fig. 1, consiste no arranjo de uma fonte de radiação, um monocromador, suporte para amostra, detector, sistema para aquisição de dados, esfera de integração, modulador, espelhos esféricos e filtros. Um esquema da bancada é mostrado na Fig. 2. O feixe de radiação produzido por uma lâmpada incandescente (filamento de tungstênio), é enviado ao monocromador. Este funciona com redes de difração permitindo obter feixes monocromáticos na sua fenda de saída, conforme o comprimento de onda escolhido. O feixe monocromático é dirigido para o interior da esfera, atingindo a superfície da amostra na direção normal, sendo refletido em todas as direções, pois se trata de uma superfície difusora, por isto a denominação normal-hemisférica da variável medida. Uma medição prévia é feita com uma amostra revestida com o mesmo material usado para o revestimento interno da esfera, sendo os dois valores obtidos usados no cálculo da refletividade, conforme o equacionamento a ser mostrado posteriormente. O detector é montado na parede da esfera, a 90° da amostra, usando-se um pequeno disco de bloqueio para que a 1ª reflexão da amostra não atinja diretamente o detector.

Os filtros tipo “passa-alto” são usados para evitar que os comprimentos de onda, submúltiplos do valor usada na medição, também atinjam o detector. Por exemplo, se um comprimento de onda de 4 μm estiver sendo usado, os

comprimentos de 2 μm , 1 μm e 0,5 μm também estarão presentes, necessitando-se portanto de um filtro que bloqueie estes comprimentos. Para evitar que a radiação ambiente influencie na medição e para uma melhor relação sinal/ruído, o sistema de medição usa uma modulação do feixe de radiação, de forma que apenas a radiação modulada seja considerada.

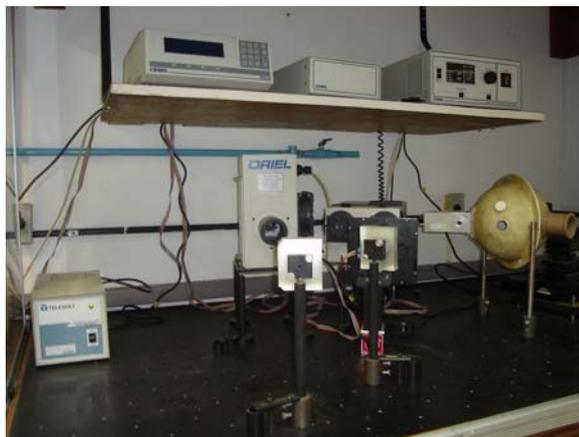


Figura 1. Bancada de radiação com esfera de integração.

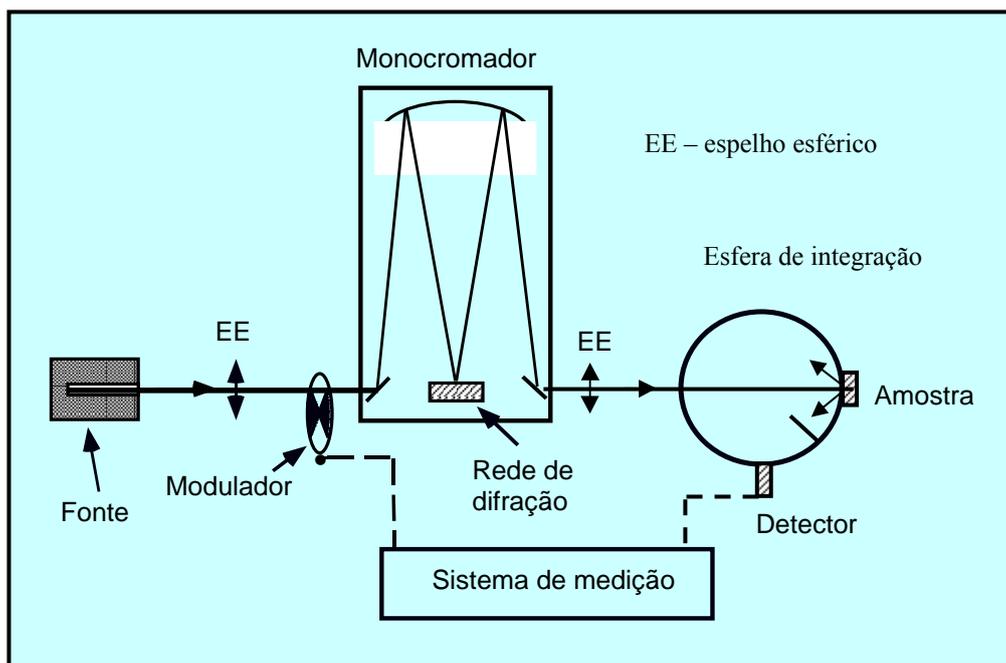


Figura 2. Bancada experimental para medições de reflectividades espectrais.

No interior da esfera foi usado um revestimento branco, disponível no mercado. Por ser um material desconhecido, medições de refletividade deste revestimento foram executadas em um equipamento do CETHIL - INSA de Lyon, França. A esfera contém uma janela para a entrada do feixe de radiação, uma janela para a colocação da amostra e ainda uma terceira janela para a montagem do detector. A medição de referência é feita com uma amostra construída com o mesmo material de revestimento da esfera. O revestimento é um material bastante difusor, de forma que a radiação incidente seja espalhada pelo interior da esfera, sendo uma parte captada pelo detector. A Fig. 3 apresenta a esfera (bipartida), à esquerda, e a esfera montada, à direita.



Figura 3. Esfera de integração em detalhes.

3. Formulação das equações para a esfera de integração

Uma esfera de integração é considerada como composta de várias superfícies (parede da esfera, janela de entrada, amostra, detector), cada qual tendo uma refletividade específica. A esfera possui uma área interna total A_s igual a πD^2 , composta por um conjunto de $n+1$ superfícies de áreas a_i , sendo ρ_i as respectivas refletividades. A área da esfera, que não é coincidente com uma das áreas a_i , tem uma refletância ρ_w , corresponde ao material da parede propriamente dita. Considera-se que a abertura de entrada possua uma refletividade nula, o mesmo acontecendo com a superfície do detector. A razão entre o valor de uma área a_i e a área total da esfera A_s é f_i . Assumindo que toda a área da esfera seja composta por superfícies refletoras difusoras, obtém-se a Eq. (1) para a refletividade média da parede da esfera (Goebel, 1967), que significa uma média ponderando-se o produto área versus a refletividade de cada superfície. A esfera forma uma cavidade bastante singular, onde o fator de forma de uma área A_1 para uma área A_2 é dado simplesmente pela relação entre a área A_2 e a área total da esfera ($A_2/A_s = A_2/\pi D^2$), independente da posição relativa entre as referidas áreas (Siegel e Howell, 1992).

$$\bar{\rho}_w = \sum_{i=0}^n \rho_i f_i + \rho_w (1 - \sum_{i=0}^n f_i) \quad (1)$$

De um fluxo P_0 incidente inicialmente em uma área a_0 , a quantidade $\rho_0 P_0$ refletida por a_0 é o total não absorvido pela amostra após a primeira reflexão. Desse fluxo, $f_i \rho_0 P_0$ incide em a_i e pela Eq. (2)

$$(1 - \sum_{i=0}^n f_i) \rho_0 P_0 \quad (2)$$

incide no restante da parede da esfera, de área dada pela Eq (3)

$$A_s - \sum_{i=0}^n a_i \quad (3)$$

Uma quantidade $\rho_i f_i \rho_0 P_0$ é refletida por a_i , enquanto que a soma das áreas a_i reflete o valor dado na Eq. (4):

$$\sum_{i=0}^n \rho_i f_i \rho_0 P_0 \quad (4)$$

e o total refletido pela área restante da esfera, Eq(3), é dado pela Eq. (5)

$$\rho_w (1 - \sum_{i=0}^n f_i) \rho_0 P_0 \quad (5)$$

Sendo assim, o fluxo total não absorvido na esfera após a segunda reflexão é $\bar{\rho}_w \rho_0 P_0$, sendo a refletividade média da parede da esfera dada pela Eq. (1). Deste valor a fração incidente sobre as aberturas é dada pela Eq. (6) e a fração incidente sobre a área restante, pela Eq. (7).

$$\sum_{i=0}^n f_i \bar{\rho}_w \rho_0 P_0 \quad (6)$$

$$(1 - \sum_{i=0}^n f_i) \bar{\rho}_w \rho_0 P_0 \quad (7)$$

Seguindo o mesmo raciocínio, a taxa refletida pela soma das aberturas está representada na Eq. (8), e a taxa refletida pela superfície restante, na Eq. (9).

$$\sum_{i=0}^n \rho_i f_i \bar{\rho}_w \rho_0 P_0 \quad (8)$$

$$\rho_w (1 - \sum_{i=0}^n f_i) \bar{\rho}_w \rho_0 P_0 \quad (9)$$

Logo, o fluxo total não absorvido na esfera após a terceira reflexão está computado na Eq. (10)

$$[\rho_w (1 - \sum_{i=0}^n f_i) + \sum_{i=0}^n f_i \rho_i] \bar{\rho}_w \rho_0 P_0; \quad (10)$$

que é igual a $\bar{\rho}_w^2 \rho_0 P_0$, quando comparada à Eq. (1).

Assim o fluxo total P_i , incidente em a_i somado após infinitas reflexões está representado na Eq. (11) e em seguida na Eq. (12).

$$P_i = f_i \rho_o P_o + f_i \bar{\rho}_w \rho_o P_o + f_i \bar{\rho}_w^2 \rho_o P_o + f_i \bar{\rho}_w^3 \rho_o P_o + \dots \quad (11)$$

$$P_i = f_i \rho_o P_o (1 + f_i \bar{\rho}_w \rho_o P_o + f_i \bar{\rho}_w^2 \rho_o P_o + f_i \bar{\rho}_w^3 \rho_o P_o + \dots) \quad (12)$$

O termo entre parênteses na Eq. (12) representa uma série, que pode ser escrita como na Eq. (13)

$$P_i = f_i \rho_o P_o / (1 - \bar{\rho}_w) \quad (13)$$

A fração F_i do fluxo inicial P_o incidente em a_i é dada por P_i/P_o .

$$F_i = f_i \rho_o / (1 - \bar{\rho}_w) \quad (14)$$

Ou ainda, usando-se a Eq. (1) para a refletividade média, tem-se a Eq (15) para a fração F_i .

$$F_i = f_i \rho_o [1 - \rho_w (1 - \sum_{i=0}^n f_i) - \sum_{i=0}^n f_i \rho_i]^{-1} \quad (15)$$

Sendo ρ_o a refletividade da primeira área atingida pelo feixe incidente (no caso a amostra), tem-se a Eq. (16), como a relação entre os fluxos que atingem uma superfície a_i , no caso o detector, sendo estes fluxos obtidos com a montagem de uma amostra a medir e a montagem de uma superfície padrão, respectivamente. O último somatório da Eq. (15) resulta apenas no termo relativo à abertura porta-amostra, considerando-se a baixa refletividade da superfície do detector e o baixo valor do respectivo fator de forma f_i . A abertura de entrada do feixe pode ser considerada também como não refletora, para o caso da radiação interna que a atinge.

$$F_a / F_p = \frac{\rho_a [1 - \rho_w (1 - \sum_{i=0}^n f_i) - f_a \rho_a]^{-1}}{\rho_p [1 - \rho_w (1 - \sum_{i=0}^n f_i) - f_p \rho_p]^{-1}}; \quad (16)$$

Onde o índice ‘a’ indica a amostra e ‘p’ o padrão. Portanto o sinal F_p é obtido com o uso de uma amostra padrão, que no caso pode ser uma amostra com o próprio acabamento da esfera ($\rho_p = \rho_w$). Por sua vez o sinal F_a é obtido com a amostra a ser testada. De posse da relação F_a/F_p , obtida por duas medições sucessivas, usa-se a Eq. (16) para se obter o valor de ρ_a .

4. Goniômetro – Método Alternativo

A refletividade espectral normal-hemisférica pode ser obtida por integração da refletividade espectral bidirecional, esta medida em equipamento semelhante, mas que use um goniômetro para girar o detector em torno da amostra em lugar da esfera de integração. A Eq. (17) fornece a relação entre as citadas refletividades (Siegel e Howell, 1992).

$$\rho = 2\pi \int_0^{\pi/2} \rho_\theta \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta; \quad (17)$$

A integração da Eq. (17) pode ser feita de forma discreta, selecionando vários ângulos de medição, partindo da direção normal até próximo a 90°. Considera-se neste caso a existência de uma simetria azimutal, de modo que a medição deva ocorrer apenas em relação ao ângulo polar θ . A grande dificuldade que surge, ocorre em relação ao baixo sinal disponível para a medição da parcela refletida da radiação. Sendo a incidência normal em relação à amostra, a reflexão ocorre em todo o hemisfério. Para o caso de detector de silício (fotocélula), de área de 10 x 10 mm e um espelho esférico de distância focal de 150 mm, o ângulo sólido é de $4,4 \cdot 10^{-3}$ sr, que comparado ao ângulo sólido do hemisfério (2π sr), obtém-se uma relação de $7,1 \cdot 10^{-4}$. Como o mesmo sistema de detecção (detector e espelho esférico), deve ser usado para medir a radiação incidente na amostra, esta relação será praticamente a relação entre os sinais a serem medidos, além de se incluir o efeito da reflexão. Assim, se o sistema de detecção estiver ajustado (através do ganho de amplificação do sinal), para medir a parcela refletida, estará com um sinal excessivo ao medir a taxa de radiação incidente na amostra. Uma alteração de ganho de amplificação dos sinais somente será possível se ocorrer de forma linear e conhecida. Entretanto, como isto não ocorre, a alteração de ganho não pode ser usada. Outra possibilidade seria de se alterar a área do feixe incidente entre uma medição e outra. Embora seja uma solução simples, deve-se verificar antes de tudo se o próprio feixe possui intensidades uniformes de radiação ao longo da sua seção transversal.

5. Resultados

5.1. Características da esfera

A esfera usada possui um diâmetro de 200 mm e as aberturas de entrada e da amostra, um diâmetro de 21,2 mm. O detector de silício possui uma área de 10 x 10 mm. Assim, a relação entre a área da abertura da amostra e a área interna total da esfera é de $2,76 \cdot 10^{-3}$. A área de detecção em relação à área total da esfera é de $8,0 \cdot 10^{-4}$. Como o detector de silício possui uma boa resposta, a medição torna-se possível. No caso do uso de um detector piroelétrico, com área circular de detecção de 1 mm de raio, a relação cai para $2,5 \cdot 10^{-5}$. Como este detector possui uma resposta em sinal menor do que o de silício, o seu sinal disponível é muito baixo, confundindo-se já com o seu ruído.

5.2. Comparação de resultados

O revestimento da esfera consiste em um material branco, disponível no mercado, sendo usado na coloração de fibra de vidro, como já citado. A sua refletividade espectral foi medida em bancada do Cethyl- INSA de Lyon e serve como padrão na Eq. (16). Uma outra amostra de cor azul foi também medida naquela bancada e serve como referência para os valores obtidos com a esfera construída.

Várias medições foram feitas e os resultados encontram-se na Fig. (4). A faixa de medição vai de 400 a 1200 nm. Observa-se uma boa concordância em praticamente toda a faixa de medição, com diferenças nos extremos: na região violeta do espectro e sobretudo na região infravermelha do espectro. As dispersões para comprimentos de onda maiores podem decorrer da necessidade de uso de filtros e mudanças de rede de difração, que podem alterar os alinhamentos da bancada. Com as várias medições, mostra-se que há repetibilidade nos resultados.

De forma geral os resultados mostram um pico de reflexão na região azul do espectro, com um valor em torno de 0,4. Na região referente ao vermelho a reflexão cai para a faixa de 0,1. Em seguida a reflexão aumenta para valores superiores a 0,5 na região infravermelha.

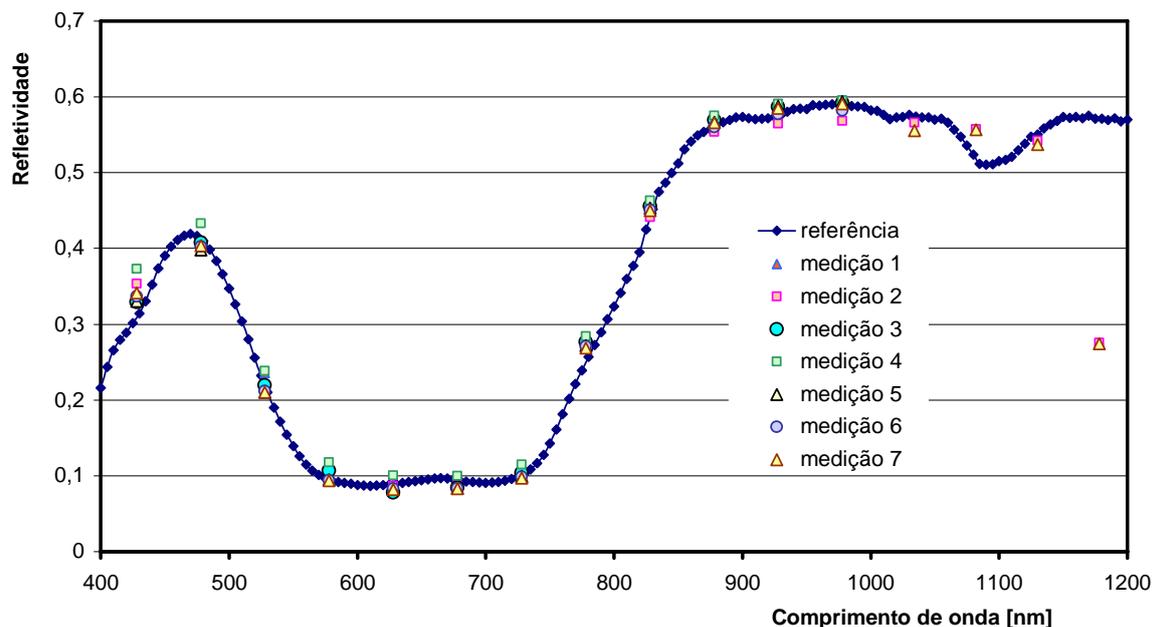


Figura 4. Medições de refletividade de amostra azul, comparadas com referência.

5.3. Medições de diferentes materiais

Considerando o grau de confiabilidade demonstrado pelo equipamento na medição da refletividade espectral normal-hemisférica, testes em amostras cobertas com tintas de uso comercial foram feitos na faixa de 450 a 1050 nm. Os resultados estão na Fig. (5).

As amostras consistem de:

- Vermelho (tinta acrílica fosca) - marca: NOVA-COR; código: 3808.93-01;
- Amarelo (tinta acrílica fosca) - marca: NOVA-COR; código: 3808.02-01;
- Verde (tinta acrílica fosca) - marca: NOVA-COR; código: 3808.81-01;
- Azul (tinta esmalte semi-brilho) - marca: BASEC; código: TVTL 009.
- Branco – revestimento interno da esfera.

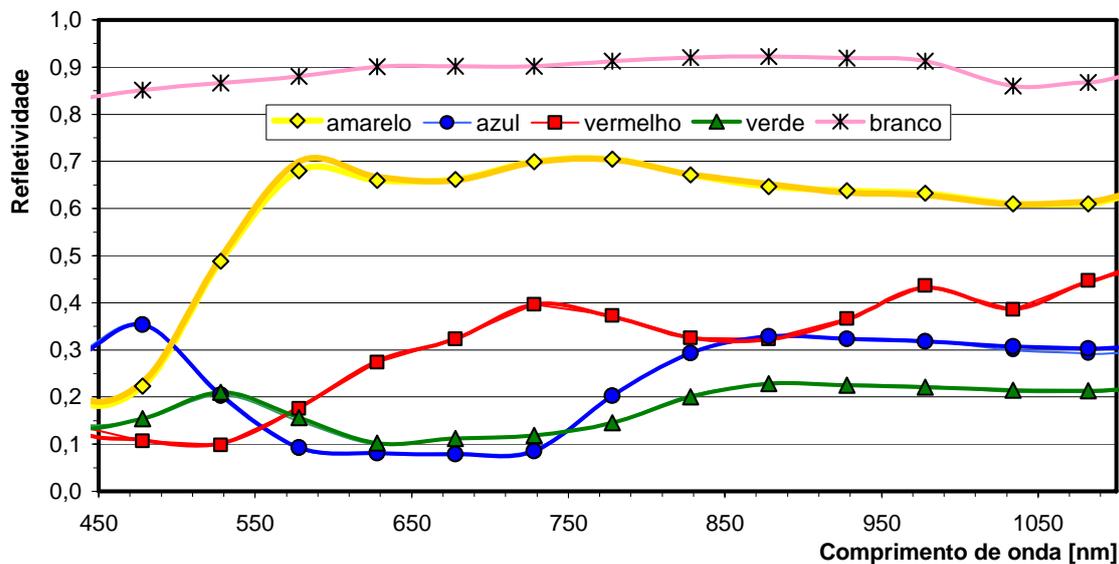


Figura 5. Refletividade espectral normal-hemisférica de diferentes tintas comerciais.

O comportamento característico de cada cor está conforme o esperado, tendo em vista que sua refletividade é maior na faixa de comprimento de onda equivalente a sua respectiva cor (Fig. 5). Entretanto há reflexão em outras cores e regiões, demonstrando apenas que nos comprimentos de ondas relativos a uma cor existe maior reflexão, mas não é uma reflexão exclusiva, como se a tinta tivesse outros componentes, refletindo em outras cores também.

No infravermelho umas tintas refletem mais e outras menos, sem que se possa identificar a razão para tal. Apenas se pode cogitar que os comportamentos diversos resultam da participação dos diferentes materiais de sua composição.

6. Agradecimentos

Ao Centre de Thermique - CETHIL – INSA de Lyon, França, pelo fornecimento de amostras para comparação.
Ao programa PIBIC-CNPq, pelo pagamento de bolsa de iniciação científica à autora.

7. Referências

- Borges, M.T.C.M., 2004, Determinação de Propriedades Radiativas Espectrais de Vidros e Películas, Dissertação de Mestrado, CPGEM, UFSC.
Goebel, D.G., 1967, Generalized Integrating-Sphere Theory, Applied Optics, vol. 6, Nº 1, pp 125-128;
Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 2002; Fundamentos de Transferência de Calor e Massa , 5ª edição, Rio de Janeiro, RJ, cap 12 e 13.
Sacadura, J.F., 1990, Measurement Techniques for Thermal Radiatives Properties, 9th International Heat Transfer Conference, vol 1 KN-12, Jerusalem, pp 207-222.
Siegel R, Howell J R, 1992 “Thermal Radiation Heat Transfer”, Hemisphere Publishing Corp., Washington.

MEASUREMENT OF SPECTRAL REFLECTIVITIES USING AN INTEGRATION SPHERE

Vicente de Paulo Nicolau
Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Catarina
vicente@emc.ufsc.br

Talita Sauter Possamai
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Catarina
taboom_2@yahoo.com.br

Abstract

This paper presents the experimental method to obtain spectral normal- hemispherical reflectivities of diffuse surfaces. Such properties are obtained through an integration sphere, for the visible and the near infrared region of the electromagnetic spectrum. The theory about the method of measurement is detailed. Results for different surfaces are shown and discussed.

Keywords: spectral reflectivity, integration sphere, thermal radiation, properties measurement.