

## ESTUDO COMPARATIVO DA TRANSMITÂNCIA DE COBERTURAS TRANSPARENTES PARA USO EM COLETOR SOLAR

**Rodrigo Ronelli Duarte de Andrade** – rodrigo\_ronelli@yahoo.com.br  
Universidade Federal de Paraíba, Departamento de Ciências Básicas e Sociais  
**Moacir Martins Machado** – moacir\_martins@yahoo.com.br  
**Antonio Pralon Ferreira Leite** – antpralon@yahoo.com.br  
Universidade Federal de Paraíba, Laboratório de Energia Solar

**Resumo.** *Diversos tipos de material isolante transparente (MIT) para uso em coletor solar têm sido estudados, visando à redução de perdas térmicas por convecção e por radiação. Coberturas MIT foram utilizadas para melhorar a eficiência do componente principal de um refrigerador solar de adsorção – o adsorvedor – que é integrado a um coletor solar do tipo CPC. A cobertura MIT consiste de uma estrutura capilar de policarbonato, com elementos em formato de colméia confinados entre duas placas de vidro, que diminui os movimentos convectivos de ar entre a superfície inferior e superior, mas possibilitam a passagem da radiação solar, embora atenuando-a. Elas são posicionadas acima e abaixo do plano formado pelos tubos do adsorvedor/coletor solar. A função do componente adsorvedor/coletor solar é captar a radiação solar durante o dia para o processo de desorção e resfriar durante a noite para propiciar o processo de adsorção. A radiação solar que atravessa a cobertura e chega à superfície absorvedora do coletor depende das características do MIT, do ângulo de inclinação e da radiação incidente. Uma bancada experimental foi desenvolvida para medir simultaneamente a radiação global que atravessa uma cobertura MIT e uma cobertura composta por apenas uma placa de vidro (cobertura simples), que é o tipo de cobertura usada comumente em coletores comerciais. Estes valores são comparados entre si e também com outros encontrados na literatura científica e, a partir de modelos para determinação da radiação direta que atravessa a cobertura, determina-se a radiação difusa que atinge a superfície absorvedora, bem como a transmitância para a radiação global do coletor. Com os valores obtidos foi determinado a transmitância total para cada ângulo de incidência entre 5° e 75°. Com esses resultados foi levantada a curva que correlacionam a transmitância total da cobertura MIT e o ângulo de incidência da radiação solar, sendo obtido um valor médio de 0,47 para a transmitância da estrutura MIT.*

**Palavras-chave:** *Material Isolante Transparente, Coletor Solar, Radiação Solar, Transmitância.*

### 1. INTRODUÇÃO

A investigação de materiais que diminuem as perdas térmicas por convecção em sistemas que utilizam energia solar remonta ao final da década de 20 do século passado (Wong *et al.*, 2007). O desenvolvimento de materiais isolantes que permitem a passagem da radiação solar resultou no que hoje se conhece como material isolante transparente (MITs). O MIT é constituído por uma estrutura de células transparentes em formato de colméia preenchidas por ar. O ar confinado nas células não desenvolve a convecção, atuando como isolante.

Materiais isolantes transparentes são utilizados em coletores solares de sistemas térmicos que trabalham com temperaturas entre 80 e 150 °C como, por exemplo, sistemas de dessalinização, sistemas que necessitam de vapor saturado de água e sistemas de refrigeração com ciclos de absorção ou adsorção (Rommel and Wagner, 1992).

Nosso grupo utiliza uma cobertura composta por MIT no coletor solar de um protótipo de refrigerador adsorvedor, tendo em vista uma melhoria em seu desempenho (Leite *et al.*, 2007). Para realizarmos este estudo necessitamos determinar qual a radiação solar que chega à superfície absorvedora do coletor, ou seja, precisamos conhecer a transmitância do MIT para a radiação solar global.

A radiação solar global é composta pelas componentes direta e difusa e, sob certas circunstâncias, a magnitude da componente difusa pode ser maior ou igual a da componente direta. A transmitância da estrutura celular para a radiação solar direta tem sido investigada por vários autores (Hollands *et al.*, 1978; Kaushika and Padmapriya, 1991; Platzer, 1992a; Platzer, 1992b). Por outro lado, apenas um estudo sobre a transmitância correspondente a radiação solar difusa foi encontrado (Arulanathan and Kaushika, 1994), o que significa que existem poucos estudos sobre a transmitância da radiação global de células MIT.

O objetivo deste trabalho é contribuir com o estudo da transmitância do MIT para a radiação solar. A seguir, é apresentada uma breve classificação do MIT, as características do material que foi utilizado, a montagem experimental bem como, os procedimentos desenvolvidos, a modelagem matemática, os resultados alcançados para a radiação total transmitida pelas coberturas de material isolante transparente e sua comparação com os resultados encontrados para a cobertura de vidro simples.

## 5.2 Classificação do MIT

Nos últimos vinte anos, o estudo teórico e experimental realizado para melhorar a eficiência dos MITs utilizou estruturas em formato de colméia com variados diâmetros internos de células (entre 10 e 2 mm) e filmes transparentes de diversos materiais, tais como polipropileno, policarbonato, poliestercarbonato, polietileno, politetrafluoretileno, etileno propileno fluorado, polimetilmetacrilato, entre outros. Estes materiais são utilizados em sistemas que trabalham com temperaturas de até 150 °C. Para aplicações que atinjam temperaturas maiores o vidro é um ótimo substituto para os materiais plásticos, no entanto, é preciso se utilizar uma espessura de parede da ordem de 100 µm já que o vidro é muito frágil (Kaushika and Sumathy, 2003).

Além do diâmetro das células e do material de que são fabricados, os MITs podem ser classificados de acordo a geometria de suas células (Wong *et al.*, 2007). Eles apresentam-se em quatro tipos (Fig. 1):

- a) estruturas paralelas,
- b) estruturas perpendiculares,
- c) cavidades
- d) estruturas quase-homogêneas.

As estruturas absorventes paralelas são formadas por camadas de vidro ou filmes transparentes de plástico sobrepostos e posicionados paralelamente a superfície absorvedora. O número de camadas pode ser aumentado para redução das perdas térmicas, mas resulta em um aumento das reflexões e uma redução do ganho solar. As estruturas perpendiculares são formadas por camadas de vidro, plástico ou ainda por capilares em formato de colméia, posicionados verticalmente a superfície absorvedora. A estrutura com formato de cavidade é uma combinação das estruturas paralela e perpendicular, consistindo de tubos planos ou de camadas múltiplas de filmes plásticos que efetivamente suprimem as perdas de calor por convecção, mas também diminuem a transmitância solar. As estruturas quase-homogêneas incluídas como MIT são compostas por fibra de vidro ou por aerogel e se caracterizam por espalhar e absorver bem menos a radiação incidente quando comparadas a outras estruturas.

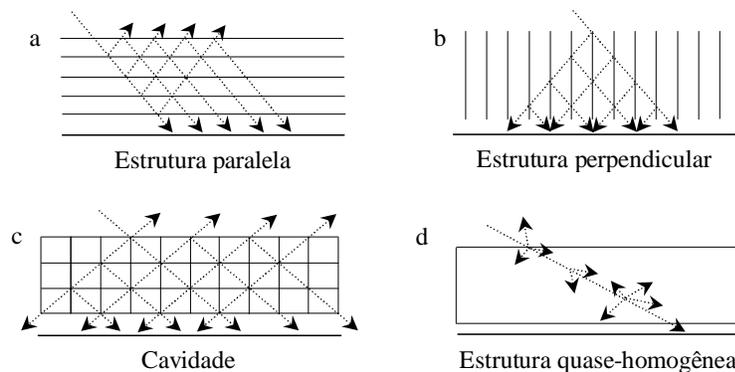


Figura 1 - Classificação dos materiais isolantes transparentes (Wong *et al.*, 2007): a) estruturas paralelas, b) estruturas perpendiculares, c) cavidades, d) estruturas quase-homogêneas.

Os MITs podem ainda variar quanto ao formato de configuração celular: células hexagonais, quadradas, retangulares, circulares (Kaushika and Sumathy, 2003).

## 2. DESCRIÇÃO DA COBERTURA TRANSPARENTE

O material isolante transparente utilizado no refrigerador adsortivo é constituído de policarbonato (fabricado pela Okalux), possui uma estrutura de célula perpendicular ao plano coletor e o formato da célula é circular, com diâmetro médio das células de 3,5 mm (Fig. 2a). O filme de policarbonato possui espessura de 20 µm e sua condutividade térmica é de 0,20 W/mK.

Para formar as coberturas, o MIT é estruturado entre duas placas planas de vidro (encapsulado) circundadas por um perfil de alumínio (Fig. 2b). Essas coberturas são posicionadas acima e abaixo da superfície absorvedora de radiação solar do refrigerador adsortivo, superfície esta constituída por uma série de 8 tubos posicionados lado a lado. Para permitir o recebimento de radiação pela parte inferior do coletor solar, foram instalados refletores semi-circulares constituídos de alumínio polido, como mostrado na Fig. 2b. Esta configuração de coletor solar é definida como coletor bi-facialmente irradiado (Goetzberger *et al.*, 1992).

A cobertura superior é formada por uma peça única com as dimensões de  $1,78 \times 0,71 \times 0,09 \text{ m}^3$ , com isolante térmico nas laterais. O MIT tem espessura de 80 mm e as placas de vidro têm espessura de 4 mm. A cobertura inferior é composta de duas peças de mesmas dimensões  $1,67 \times 0,34 \times 0,07 \text{ m}^3$ , fixadas lateralmente em uma barra comum, de perfil retangular, através de dobradiças. O MIT tem espessura de 60 mm e as placas de vidro têm espessura de 3 mm. As duas partes da cobertura inferior são articuladas em torno de um eixo comum central e longitudinal (Fig. 2b).

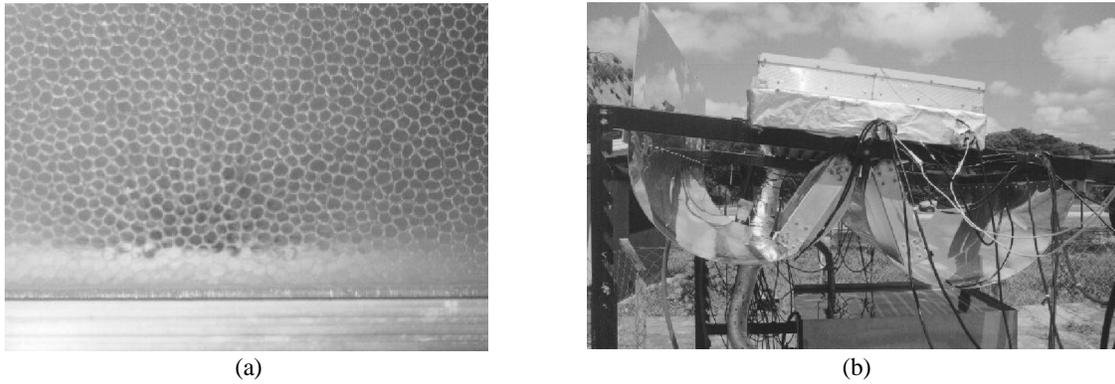


Figura 2 - a) Material isolante transparente em policarbonato (vista superior); b) Vista geral do coletor solar com as coberturas MIT superior, inferiores e refletores.

### 3. TRANSMITÂNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR

A transmitância da radiação direta para o MIT encapsulado é expressa pela seguinte equação aproximada, a qual não leva em conta as múltiplas reflexões entre o MIT e as placas da cobertura (Arulananthan e Kaushika, 1994):

$$\tau_d = \tau_v \times \tau_a \times \tau_{MIT} \quad (1)$$

onde,  $\tau_v$  é a transmitância de uma cobertura com  $N$  placas de vidro, de espessura  $Z_v$ , dada pela equação (Duffie e Beckman, 1980):

$$\tau_v = \frac{1}{2} \left[ \frac{1 - r_{\perp}}{1 + (2N - 1)r_{\perp}} + \frac{1 - r_{\parallel}}{1 + (2N - 1)r_{\parallel}} \right] \quad (2)$$

sendo,  $r_{\perp}$  e  $r_{\parallel}$  as componentes perpendicular e paralela da luz não-polarizada, dadas por:

$$r_{\perp} = \frac{\text{sen}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{sen}^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (3)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\text{tan}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{tan}^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (4)$$

$\theta_1$  e  $\theta_2$  são, respectivamente, os ângulos de incidência e de refração da luz, em relação à normal na interface dos dois meios que, de acordo com a lei de Fresnel:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\text{sen}\theta_2}{\text{sen}\theta_1} \quad (5)$$

Para o ar,  $n_1 = 1$ , e para o vidro,  $n_2 = 1,526$ .

A transmissividade elementar da placa,  $\tau_a$  é dada pela lei de Bouguer:

$$\tau_a = e^{-KZ_v/\cos\theta_2} \quad (6)$$

onde  $K$  é o coeficiente de extinção do meio, cujo valor varia de  $4 \text{ m}^{-1}$ , para vidros de alta qualidade, a  $32 \text{ m}^{-1}$ , para vidros comuns. Adotou-se  $K = 30 \text{ m}^{-1}$ .

A transmitância para a radiação solar direta das células da estrutura MIT,  $\tau_{MIT}$ , é determinada pelas seguintes equações (Hollands, 1978):

$$\tau_{MIT} = 0,5 \left[ 1 + \rho_s^n (n + 1 - R) + \rho_s^{n+1} (R - n) \right] \quad (7)$$

onde  $R = H(D \tan \theta)$ , sendo  $H$  e  $D$ , respectivamente, a altura e o diâmetro das células,  $n$  é a parte inteira de  $Re \rho_s$  é a refletividade equivalente especular, cujo valor adotado foi de 0,97.

#### 4 MONTAGEM EXPERIMENTAL

Para a avaliação da cobertura MIT e medida de sua transmitância foi montada uma bancada experimental (Fig. 3), descrita a seguir.

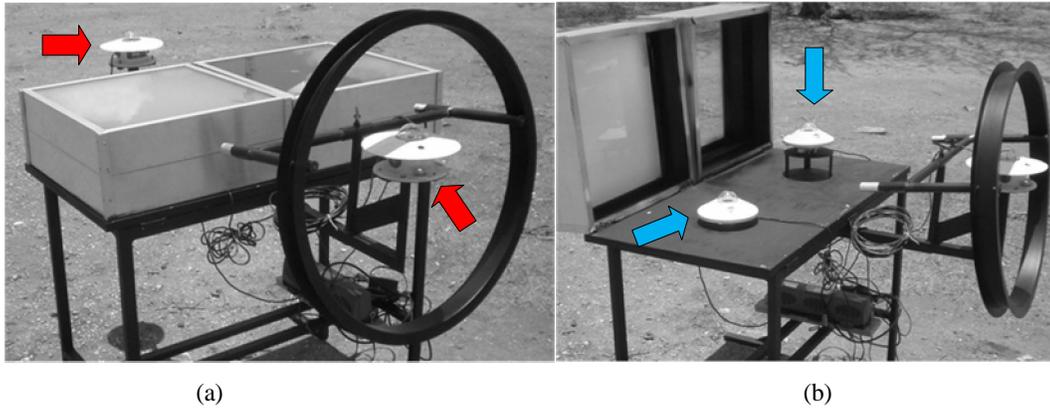


Figura 3 - a) Bancada experimental para avaliação da transmitância do MIT (vista geral);  
b) Vista interna da bancada com os radiômetros instalados.

A bancada é constituída por duas caixas de alumínio, medindo cada uma  $0,50 \text{ m} \times 0,50 \text{ m} \times 0,20 \text{ m}$ . Em uma delas o MIT encontra-se entre duas placas de vidro (encapsulado) enquanto a outra possui apenas uma placa de vidro, que é o tipo de cobertura usada comumente em coletores comerciais. O MIT tem espessura de 60 mm e as placas de vidro têm espessura de 3 mm, mesma configuração das coberturas inferiores do adsorvedor/coletor solar. As paredes internas da caixa são pintadas com tinta preta fosca, bem como a superfície onde estas caixas são fixadas, a fim de não refletirem a radiação solar.

No interior das caixas dois radiômetros Kipp & Zonen Holland, do tipo CM 11 estão instalados a 0,015 m da placa de vidro (Fig. 3b) e medem a radiação solar global que atravessa a cobertura simples e a composta pelo MIT. Externamente, dois radiômetros Eppley, modelo 2, medem a radiação solar global e a difusa, simultaneamente. Para a medida da radiação difusa é utilizado um anel sombreador de alumínio, pintado de preto fosco, de raio externo de 0,62 m, raio interno de 0,57 m e com uma largura igual a 0,05 m.

#### 4.1 O Sistema de Automação da Bancada Experimental

O sistema de automação da Bancada Experimental é responsável pela aquisição e gerenciamento dos dados do experimento. As informações são coletadas através de equipamentos de aquisição de dados e em seguida enviadas a um computador, onde são devidamente tratadas e armazenadas. Na Fig. 4 mostra-se a representação dos componentes físicos do sistema de automação.

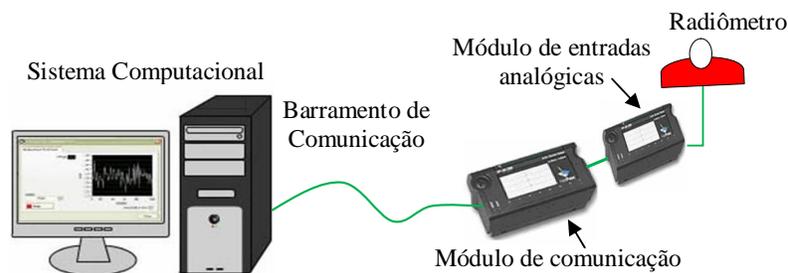


Figura 4 - Componentes físicos do sistema de automação.

Na Fig. 5 apresenta-se a interface gráfica desenvolvida no software LabVIEW 7.1. Esta interface mostra, em tempo real, as diversas variáveis simultaneamente na tela, no gráfico ou numericamente, o que possibilita uma

visualização imediata da operação do sistema. Esta tela apresenta uma visão geral dos dados da operação, que representam o processo em desenvolvimento.

O mesmo software foi utilizado para a calibração dos radiômetros, tomando um deles como o padrão. Eles tiveram suas curvas de calibração levantadas, dando origem a uma equação de ajuste para cada radiômetro.

Todos os radiômetros são diretamente ligados a um sistema de aquisição de dados denominado Field Point, da National Instruments. Este sistema é constituído de um módulo de comunicação, FP-2000, e de um módulo de entradas analógico, FP-AI-112, de 16 canais. O Field Point coleta as informações de tensão elétrica, oriundas dos radiômetros, e insere-as em um protocolo de comunicação. Por intermédio de um barramento de comunicação o Field Point, envia os dados coletados a um computador. O computador utiliza um software aplicativo especialmente desenvolvido para converter em unidades adequadas o sinal elétrico recebido. Os dados, então, são armazenados em arquivos padronizados e a partir daí são acessados por um programa de usuário para os cálculos necessários serem realizados.

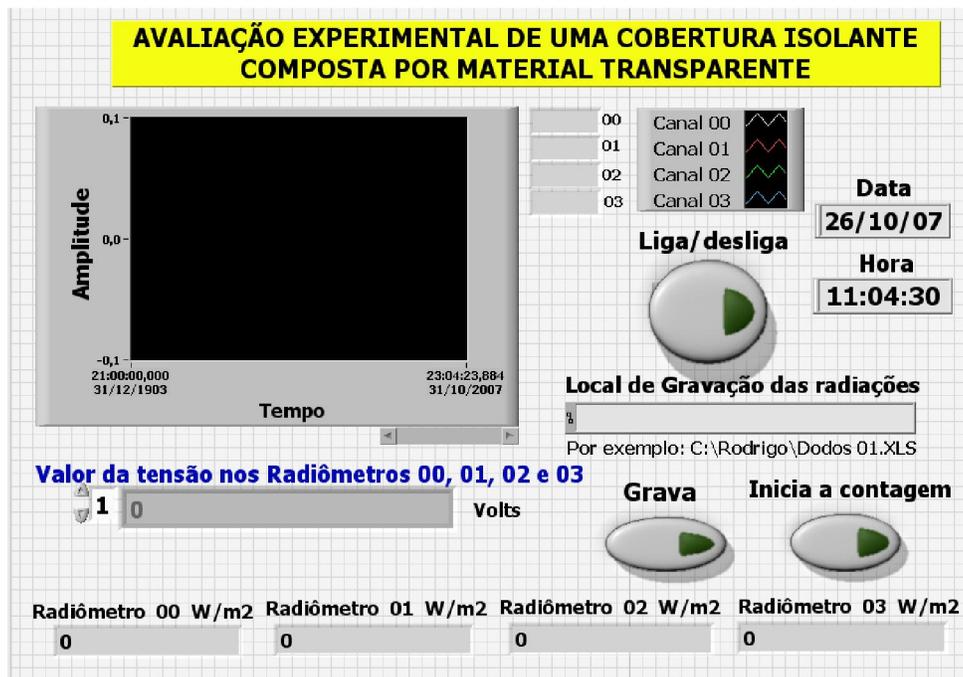


Figura 5 - Interface gráfica que apresenta, em tempo real, os dados coletados nos radiômetros.

A bancada foi exposta à radiação solar nos dias 22, 23, 27, 28, 29 e 30 de outubro de 2007, pela manhã e a tarde. Durante o período de exposição o céu não se manteve predominantemente limpo.

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 5.1 Radiação Medida

Em função dos valores medidos para o ângulo de  $0^\circ$  não ter sido suficiente pra uma boa amostragem, e para os ângulos maiores de  $75^\circ$  não serem precisos em virtude de limitações no sistema de coleta das informações (o sistema trabalha com valores mínimos de tensão muito maiores do que a energia com ângulos superiores a  $75^\circ$  podem fornecer para se ter valores consistentes), foram trabalhados ângulos de incidência que encontram-se entre  $5^\circ$  e  $75^\circ$ .

A Fig. 6 apresenta o gráfico da radiação global, direta e difusa medidas no plano exterior de captação da bancada experimental, e da radiação global medida no interior da cobertura MIT e da cobertura de vidro simples em função do horário local, dada em  $W/m^2$ , para o período entre as 11 e 16 horas, do dia 30 de outubro de 2007. Este é um período de céu predominantemente limpo.

Os valores da radiação direta da Fig. 6 foram encontrados a partir da radiação difusa subtraídos da radiação global medidas pelos radiômetros localizados externamente na bancada.

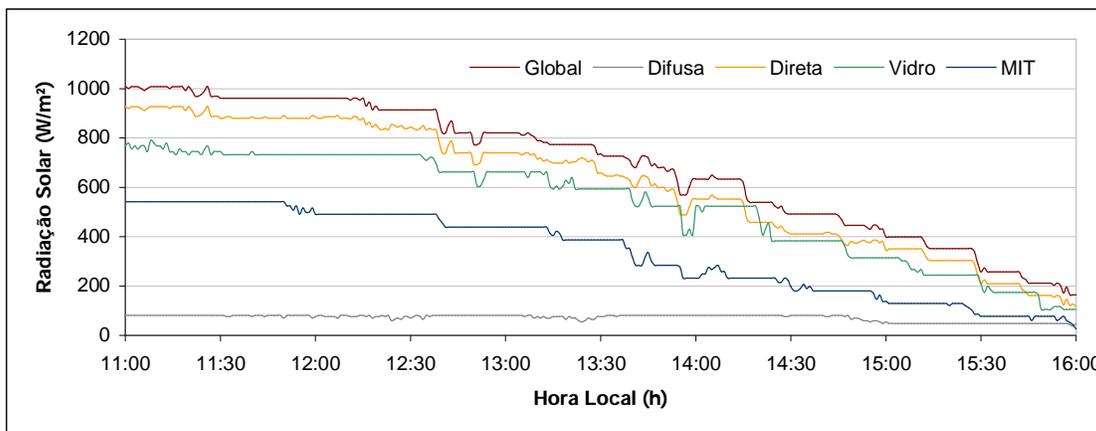


Figura 6 - Gráfico da radiação global, difusa e direta, medidas no plano exterior de captação da bancada experimental, e radiação global medida no interior da cobertura MIT e de vidro, para o dia 30/10/2007.

### 5.2 Curvas Experimentais da Radiação Global

A partir das medidas de radiação realizadas, os valores para a transmitância global foram determinados para cada ângulo de incidência calculando-se a razão entre a energia global medida externamente e as energias medidas internamente para cada cobertura. Para cada ângulo de incidência foram tomados valores com  $\pm 0,5^\circ$  de tolerância, por exemplo, para o ângulo de  $5^\circ$  foram utilizados os valores de radiação incidente entre  $4,5^\circ$  até  $5,5^\circ$ .

Calculadas as transmitâncias para cada ângulo, foi determinada a média aritmética desses valores, o que resultou em uma transmitância média da radiação solar para cada ângulo entre  $5^\circ$  e  $75^\circ$ , sendo tomados a cada  $5^\circ$  graus.

Na Fig. 7 apresentam-se os valores de transmitância medidos para a cobertura MIT em função do ângulo de incidência da radiação solar. A reta que aparece em cada gráfico são as linhas de tendência para cada ângulo.

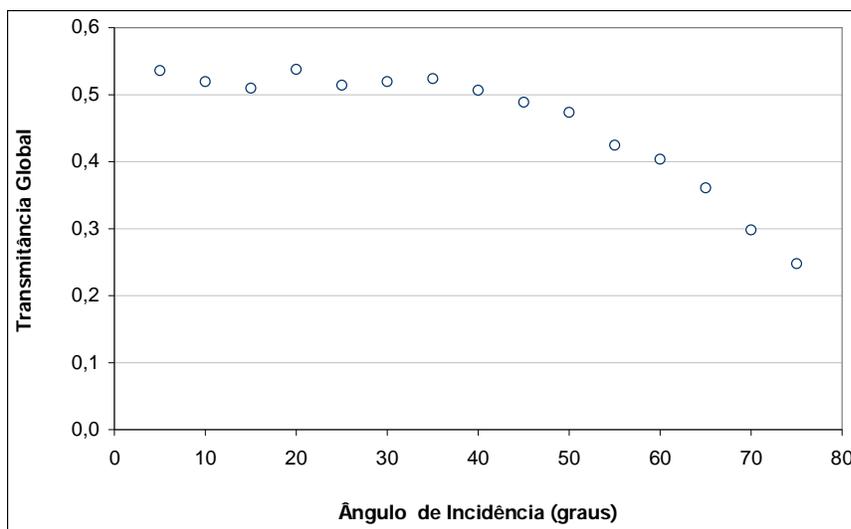


Figura 7 - Gráfico da transmitância medidos para a cobertura MIT em função do ângulo de incidência da radiação solar.

Com os valores apresentados na Fig. 7, determinou-se o valor médio da transmitância global da cobertura MIT e o mesmo foi feito para a cobertura de vidro simples. O resultado das médias é de uma transmitância global de 0,47 para a cobertura MIT e de 0,84 para a cobertura de vidro.

### 5.3 Discussão

Um único trabalho sobre a transmitância da radiação difusa em materiais isolantes transparentes foi encontrado em Arulanantham e Kaushika, (1994). Para três tipos diferentes de MIT, eles determinaram expressões polinomiais de segundo grau para ângulos de radiação direta equivalente a transmitância da radiação difusa. Esse trabalho serviu de

referência para o nosso, mas não foi realizada nenhuma comparação, pois determinamos a transmitância da radiação direta e difusa conjuntamente, considerando uma transmitância global para a radiação solar.

Critoph *et al* (1997) realizaram medidas com uma cobertura simples e com uma cobertura composta por uma estrutura MIT de policarbonato de 100 mm de espessura, coberta por uma única placa de vidro, ambas mantidas a uma inclinação constante de 45° com a horizontal e com a radiação incidente perpendicular aos tubos. Encontraram os seguintes valores de transmissividade para essas configurações: 0,77 para a cobertura simples e 0,48 para a cobertura com o MIT.

Para uma cobertura composta MIT de estrutura capilar em vidro de diâmetro de célula de 30 mm e espessura de 100 mm, coberto por uma placa de vidro, Rommel e Wagner (1992) determinaram para a transmitância da radiação direta o valor de  $0,67 \pm 0,03$  e para a transmitância da radiação difusa o valor de  $0,41 \pm 0,04$ .

## 6 CONCLUSÃO

Uma bancada experimental foi montada para testar uma cobertura isolante composta por material transparente (MIT), como componente de um refrigerador solar adsorativo autônomo.

Com os dados obtidos foram determinados os valores de transmitância global para dois tipos de coberturas, uma com MIT encapsulado e uma composta por um vidro simples. Para o primeiro tipo de cobertura foi obtido 0,47 e para o segundo um valor de 0,84, levando-se em conta um ângulo de incidência entre 5° e 75°.

A seqüência desse trabalho será dada com a medida de valores que englobem os demais ângulos de inclinação para que se possa determinar um valor mais preciso para a transmitância global do tipo de cobertura aqui analisado.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro dado a este trabalho através do projeto de pesquisa N° 473256/2006-1.

## 7 REFERÊNCIAS

- Arulanantham, M. Kaushika, N.D. 1994. Global Radiation Transmittance of Transparent Insulation Materials, *Solar Energy*, vol. 53, n. 4, pp. 323-328.
- Critoph, R.E. Tamainot-Telto, Z. Munyebvu, E. 1997. Solar Sorption Refrigerator, *Renewable Energy*, vol. 12, n. 4, pp. 409-417.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1980. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons.
- Goetzberger, A. Dengler, J. Rommel, M. Götttsche, J. Wittwer, V. 1992. A new transparently insulated, bifacially irradiated solar flat-plate collector, *Solar Energy*, vol. 49, n. 5, pp. 403-411.
- Hollands, K.G.T. Marshall, K.N. Wedel, R.K. 1978. An Approximate Equation for Predicting the Solar Transmittance of Transparent Honeycombs, *Solar Energy*, vol. 21, pp. 231-236.
- Kaushika, N.D. Padmapriya, R., 1991. Solar Transmittance of Honeycomb and Parallel Slat Arrays, *Energy Conversion and Management*, vol. 32, n. 4, pp. 345-351.
- Kaushika, N.D. Sumathy, K. 2003. Solar Transparent Insulation Materials: A Review, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 7, pp. 317-351.
- Leite, A.P.F. Grilo, M.B. Andrade, R.R.D. Belo, F. A. Meunier, F. 2007. Experimental Thermodynamic Cycles and Performance Analysis of a Solar-Powered Adsorptive Ice-maker in Hot Humid Climate, *Renewable Energy*, vol. 32, pp. 697-712.
- Platzer, W.J. 1992a. Calculation procedure for collectors with a honeycomb cover of rectangular cross section, *Solar Energy*, vol. 48, pp. 381-393.
- Platzer, W.J. 1992b. Directional-hemispherical solar transmittance data for plastic type honeycomb structures, *Solar Energy*, vol. 49, pp. 359-369.
- Rommel, M. Wagner, A. 1992. Application of Transparent Insulation Materials in Improved Flat-Plate Collectors and Integrated Collector Storages, *Solar Energy*, vol. 49, n. 5, pp. 371-380.
- Wong, I.L. Eames, P.C. Perera, R.S. 2007. A Review of Transparent Insulation Systems and the Evaluation of Payback Period for Building Applications, *Solar Energy*, vol. 81, n. 6, pp. 1058-1071.

## **COMPARATIVE STUDY OF TRANSMITTANCE OF TRANSPARENT COVERINGS USED IN SOLAR COLLECTOR**

**Abstract** Several types of transparent insulating material (TM) to use in solar collector have been studied, aiming to the reduction of thermal losses for convection and for radiation. Coverings TM were used to improve the efficiency of the main component of an adsorption solar refrigerator - the adsorber - that is integrated to a solar collector of the type CPC. The covering TM consists of a capillary structure of polycarbonate, with elements in beehive format confined among two glass plates, that it reduces the convection of air among the inferior and superior surface, but they make possible the passage of the solar radiation. They are positioned above and below the plan formed by the tubes of the adsorber/solar collector. The solar radiation that it crosses the covering and it arrives to the absorbing surface of the collector depends on the characteristics of TM, of the inclination angle and of the incident radiation. An experimental bench was developed to measure the global radiation simultaneously that it crosses a covering TM and a covering composed for just a glass plate (simple covering), that it is the covering type used commonly in commercial collectors. These values are compared and also with other found in the scientific literature and, starting from models for determination of the direct radiation that crosses the covering, is determined the diffuse radiation that it reaches the absorbing surface, as well as the transmittance for the global radiation of the collector. With the obtained values it was certain the global transmittance for each incidence angle between 5 and 75 degrees. With those results was built a graph that correlate the global transmittance of the covering TM and the angle of incidence of the solar radiation, was gotten up being obtained a medium value of 0,47 for the transmittance of the structure TM.

**Key words:** Transparent Insulation Material, Solar Collector, Solar Radiation, Transmittance.