

Pireliometria para Determinação da Transmitância Solar

Elton G. Rossini,^{a,b} Arno Krenzinger^b, Paulo A. Soave^c, Elizandra Martinazzi^d, Flavio Horowitz^{cd}

^a UERGS – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul Rua dos Inconfidentes,
395, CEP 93340-140 - Porto Alegre - RS – Brasil - elton-rossini@uergs.br

^b Lab. Energia Solar, PROMEC – UFRGS, Rua Sarmento Leite, 425,
CEP 90050-170, Porto Alegre - RS – Brasil, arno@mecanica.ufrgs.br

^cPPGMICRO e ^dLab. Laser&Óptica, Instituto de Física – UFRGS,
Campus do Vale, CEP 91501-970, Porto Alegre - RS – Brasil - flavio@if.ufrgs.br

Received 11 de Abril de 2006; aceito para publicação em 16 de Junho de 2006

Pela sua relevância na eficiência energética de edificações, busca-se determinar a transmitância média no espectro solar, à incidência normal, de uma série de vidros, policarbonatos e películas semitransparentes. Com vistas a estabelecer uma prática experimental conveniente, que conjugue medições simples em condições externas com confiabilidade de resultados acurados, investiga-se a aplicação de um pireliômetro de primeira classe em banda larga (250 nm a 3000 nm), através da análise comparativa com medições espectrais. Estas são realizadas com uma família de espectrofotômetros, mutuamente aferidos por intercomparações nas regiões de superposição de suas faixas de cobertura, que combinadas varrem todo o espectro solar. Considerados os diversos fatores influentes nas medições pireliométricas, é apresentada uma estimativa da incerteza das medições de transmitância ($\pm 0,02$). Em decorrência, a concordância alcançada entre seus resultados e os das medidas espectrais integradas no espectro solar, para amostras com baixo espalhamento de luz e dentro das incertezas experimentais, evidencia acurada aplicabilidade da pireliometria para medidas de campo de uma vasta gama de materiais solares semitransparentes.

Palavras-chave: eficiência energética, radiação solar, energia solar, transmitância, pireliometria, materiais semitransparentes.

Due to its relevance in the energy efficiency of buildings, determination of the average transmittance in the solar spectrum is pursued, at normal incidence, for a series of semitransparent glasses, polycarbonates and coatings. With regard to establishing a convenient experimental practice, which combines simple measurements in outdoor conditions with reliability of accurate results, application of a wideband (250 nm to 3000 nm), first-class pyrhelimeter is investigated, through comparative analysis with spectral measurements. These are performed with a family of spectrophotometers, mutually gauged by intercomparisons in the overlap regions of their coverage ranges, which combined scan the whole solar spectrum. Considered the several factors that influence pyrhelometry, an estimate of uncertainty is presented for its transmittance measurement ($\pm 0,03$). As a consequence, the agreement attained between its results and those from integrated spectral measurements in the solar spectrum, for samples with low light scattering and within the experimental uncertainties, evidences accurate applicability of pyrhelometry to field measurements of a wide variety of semitransparent solar materials.

Keywords: energy efficiency, solar radiation, solar energy, transmittance, pyrhelometry, semitransparent materials.

I. INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades ópticas de vidros e materiais semitransparentes, normalmente empregados em janelas, é de grande importância para a tecnologia de construção, especialmente quando se deseja minimizar a utilização de energia elétrica em edificações. De fato, muitas pesquisas envolvem, direta ou indiretamente, o conhecimento desses dados, tanto para otimizar o aproveitamento da iluminação natural em diferentes aplicações [Athienitis and Tzempelikos, 2002], quanto para avaliar o comportamento termoenergético de interiores [Pereira et al., 2004; Pereira, 2005]. Nessas aplicações, parâmetros relacionados com as propriedades ópticas podem permitir a caracterização do desempenho de janelas e sua relação com o balanço energético [Karlsson et al.]. Em certos casos, a transmitância solar de diferentes materiais utilizados em edificações, estufas agrícolas, aplicações automotivas, entre outras, é determinada através de normas in-

ternacionais para medições de acordo com o tipo de material, como por exemplo: *ISO 9050* para vidros, *ASTM D1003* para plásticos e *ISO 9211-2:1994* para recobrimentos. A relevância do tema também se evidencia pela diversidade de materiais comercializados no mercado nacional, algumas vezes sem a informação completa de suas propriedades.

A motivação inicial desta pesquisa veio da necessidade de se obter as características ópticas de alguns materiais disponíveis no mercado nacional, para servirem como dados de entrada de um programa de simulação para o ambiente construído. Essa simulação foi realizada pelo *EnergyPlus*, um software testado a partir de comparações analíticas [Henninger et al, 2004] e semi empíricas [Grings, 2003]. Esse software é composto por diversos modelos que são empregados em conjunto [*EnergyPlus* (a); Winkelmann, 2001] e, de acordo com os dados de entrada [*EnergyPlus* (b)], pode ser usado para avaliar o conforto térmico, a ventilação natural e as condições de luz do dia, em edificações com di-

ferentes configurações de janelas e sob diferentes condições geográficas e climáticas.

O objetivo deste trabalho é validar as medições externas da transmitância solar com incidência normal realizadas com um pireliômetro de primeira classe. Os resultados fornecidos por esta técnica, relativamente simples e com rápida medição global em banda larga, são comparados com valores espectrais, obtidos por meio de espectrofotômetros e integrados na região espectral coberta pelo pireliômetro, sob condições atmosféricas padronizadas [ASTM E891-87]. A incerteza é estimada empregando-se uma metodologia de avaliação documentada no Guia para Expressão da Incerteza de Medição, 1998. Um procedimento experimental é proposto, visando aproveitar as principais vantagens das medições realizadas em condições externas (*outdoor conditions*).

Uma desvantagem que pode ser atribuída às medições realizadas em condições externas está na dificuldade de se estabelecer um controle rigoroso das condições de medição, para uma série de observações. Entretanto, isso não implica na impossibilidade de se estabelecer uma base de dados confiáveis, que podem servir para diversas aplicações, como por exemplo, as medições radiométricas realizadas na validação de modelos físicos baseados em imagens digitais fornecidas por satélites [Kratzemberg et al., 2003].

No presente caso, a obtenção de bons resultados em condições externas é facilitada pela determinação de uma grandeza relativa, em que um par de medições é realizado em condições praticamente idênticas.

II. DETERMINAÇÃO DA TRANSMITÂNCIA SOLAR DE MATERIAIS SEMITRANSSPARENTES

A transmitância, uma propriedade óptica significativa no estudo de materiais semitransparentes, pode ser genericamente definida pela razão entre o fluxo normal de radiação que atravessa o material e o fluxo de radiação incidente. Essa grandeza pode ser determinada em função do ângulo de incidência e da faixa espectral da radiação eletromagnética. Em muitos casos, a incidência normal à superfície é o parâmetro angular mais significativo. Em relação às características espectrais, é usual a determinação da transmitância, onde os valores espectrais são integrados para todos os comprimentos de onda de uma certa região de interesse, ou seja,

$$\tau_{\theta r} = \frac{\int_{\lambda_0}^{\lambda_f} \tau_{\theta}(\lambda) I_{\theta}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_0}^{\lambda_f} I_{\theta}(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

onde o subíndice θ refere-se a um determinado ângulo de incidência; o subíndice do resultado, r , está indicando que os limites de integração cobrem uma região espectral de interesse; (λ) representa a dependência funcional com o comprimento de onda. Mudando-se os intervalos de integração da Equação (1), é possível determinar a transmitância nas regiões básicas que compõem o espectro solar, isso é, ultravioleta, visível, infravermelho. Normalmente, essas grandezas são determinadas nas aplicações de energia solar, como por exem-

plo, no estudo de cobertura para coletores [Keppler, 1978]. Certas aplicações que tratam do desempenho energético de edificações têm como dado de entrada a transmitância visível [Johnson et al., 1984], que geralmente exige o conhecimento da distribuição espectral da função de resposta fotópica do olho humano.

III. INSTRUMENTAÇÃO

Parte da atividade experimental, relacionada às medições da transmitância solar normal, τ_{ns} , foi realizada no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), na latitude $30^{\circ} 3'$ Sul, longitude $51^{\circ} 2'$ Oeste e altitude de 10 m.

Todas essas medidas foram obtidas empregando-se um pireliômetro de primeira classe *Eppley* (*Eppley Normal Incidence Pyrheliometer - NIP*), com fator de calibração de $8,9 \times 10^{-6} \text{ V.W}^{-1}.\text{m}^{-2}$. Esse instrumento de campo, versátil e de fácil operação, é amplamente utilizado na área de energia solar e descrito na literatura básica [Coulson, 1975, Iqbal, 1983]. A Tabela 1 apresenta algumas das principais características do equipamento.

Originalmente desenvolvido para medir a irradiância solar direta com incidência normal, o pireliômetro *Eppley*, cujo esquema está representado na Figura 1, é construído a partir de um tubo colimado, com campo de visão de $5,725^{\circ}$. A parte externa do tubo é cromada, enquanto a parte interna é pintada de negro. Um alvo externo permite posicionar o instrumento de modo que a radiação solar direta atinja o sensor com incidência normal sem que ocorram reflexões no interior do tubo. A extremidade de abertura é coberta por uma janela de cristal de quartzo com espessura de 1mm. Na extremidade oposta localiza-se o elemento sensor constituído por uma termopilha de multijunção recoberta por uma pintura *3M Velvet Black*. Os dados medidos com o pireliômetro foram adquiridos por um multímetro *HP34970A*.

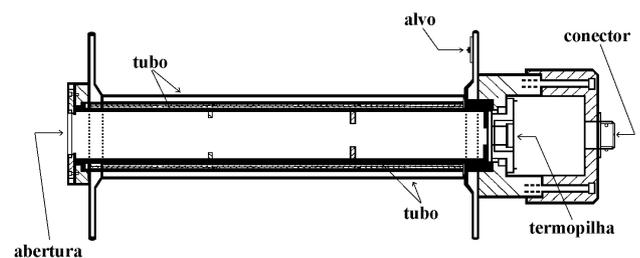


FIG. 1: Esquema do pireliômetro *Eppley NIP*.

Para validar a metodologia proposta nesta pesquisa, foram realizadas medições da transmitância espectral normal, $\tau_{ns}(\lambda)$, junto ao grupo de pesquisadores do Laboratório Laser & Óptica da UFRGS. O tratamento desses dados espectrais

Tabela 1: Especificações do pireliômetro *Eppley*.

Pireliômetro <i>Eppley</i> – <i>NIP</i>	
Sensibilidade	aprox. $8 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
Impedância	aprox. 200 Ohms
Linearidade	$\pm 0,5 \%$, de 0 a 1400 W m^{-2}
Tempo de resposta	1s (1/e sinal) ou 4 s (máximo)

forneceu os valores de transmitância solar normal, T_{ns} , para serem comparados com os resultados das medições, τ_{ns} , realizadas com o pireliômetro.

A completa caracterização, abrangendo todo o espectro de interesse, foi constituída de medições de transmitância espectral normal, empregando-se cinco espectrofotômetros de três fabricantes: (i) *Varian (Cary UV-VIS-IV)*; (ii) *CVI (UV, VIS, IV)*; (iii) *Fourier Transform Perkin Elmer Spectrum 1000 - FTIR*, cujas respectivas faixas espectrais cobertas estão listadas na Tabela 2.

Esses espectrofotômetros essencialmente empregam configurações de medição similares entre si: o sinal de um feixe de luz incide quase normalmente na superfície da amostra, propagando-se através dela, e é capturado por um detector. A Figura 2 apresenta um esquema da montagem realizada para adaptar a amostra no sistema óptico do espectrômetro *CVI*, que emprega transporte luminoso por fibra óptica. Essa configuração óptica é similar às utilizadas nos espectrômetros *Cary* e *Perkin Elmer*, excetuando-se o emprego de fibra óptica. A abertura angular do feixe incidente sobre a amostra é inferior a 8° . A medição da radiação incidente é realizada na ausência da amostra e nas mesmas condições.

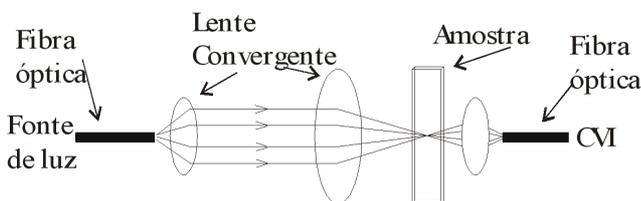


FIG. 2: Arranjo experimental desenvolvido para medições com o espectrofotômetro *CVI*.

Adicionalmente, foi verificada a consistência detalhada dos resultados espectrais, através da análise intercomparativa nas regiões de superposição das faixas de cobertura dos diferentes espectrofotômetros. Na Tabela 3 são listados as lâmpadas e os detectores empregados por cada um dos espectrofotômetros, e sua correspondente faixa espectral.

IV. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, as amostras pesquisadas foram separadas em três grupos: (i) vidros, (ii) policarbonatos e (iii) vidros

recobertos com películas semitransparentes. O grupo (i), contendo as amostras de vidro, serviu para uma primeira avaliação da técnica, para verificar as possíveis dificuldades nas medições, para treinamento do operador e, a partir desses testes, definir um procedimento experimental. Embora existam diferenças na composição dos vidros, esses materiais têm suas propriedades ópticas muito pesquisadas e documentadas na literatura e em outras fontes. Definido um procedimento experimental, realizaram-se as medições no grupo dos policarbonatos, com amostras de 0,30 cm de espessura e de dimensões de 8,0 cm x 12 cm. Finalmente, realizaram-se as medições no grupo de películas aplicadas sobre vidros. Na caracterização dessas amostras, de dimensões 25 cm x 25 cm, foi empregada uma configuração similar à de uma possível utilização comercial, ou seja, recobrindo um vidro comum com espessura típica de 0,40 cm.

A. Medições com o pireliômetro

A utilização do pireliômetro, para determinar a transmitância solar normal, permite apenas a caracterização de amostras com um baixo espalhamento de luz. De acordo com a Equação (1), a transmitância solar com incidência normal, τ_{ns} , é determinada pela razão entre a fração de irradiância direta normal que atravessa a amostra e a irradiância solar direta normal incidente.

O procedimento experimental consiste em, primeiramente, posicionar o pireliômetro na direção do disco solar e registrar o valor referente ao fluxo de radiação solar com incidência normal, registrada no multímetro (em mV).

Para converter os valores de tensão de saída, M , em unidades de irradiância (W.m^{-2}), basta empregar o fator de calibração, k , do pireliômetro, fazendo-se:

$$I_D = \frac{M}{k} \quad (2)$$

Assim, esse procedimento resulta na medida da irradiância solar direta normal, I_D , representada pelo denominador da Equação (1), isso é,

$$I_D = \int_{\lambda_0}^{\lambda_f} I_D(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

Imediatamente, realiza-se uma nova medição, dessa vez tendo uma amostra na frente do tubo do pireliômetro. A superfície da amostra deve ser posicionada de modo que a

Tabela 2: Faixa de cobertura utilizada dos espectrofotômetros, evidenciando as regiões de superposição nas diferentes bandas espectrais.

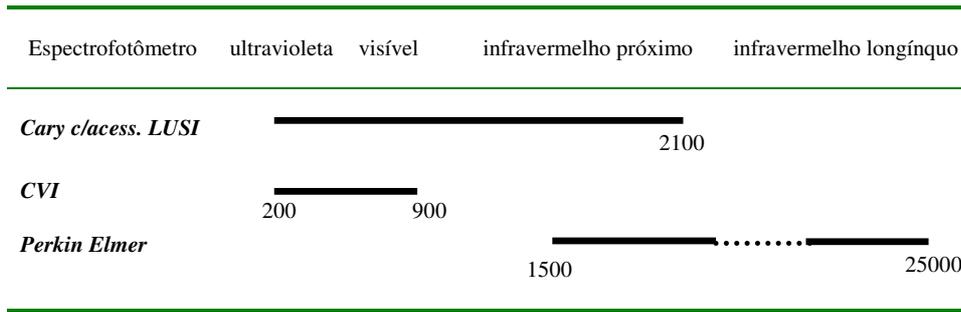


Tabela 3: Região do espectro, fontes e detectores empregados pelos espectrofotômetros.

Espectrofotômetro	Região Espectral	Fonte	Detector
<i>Cary 14</i>	UV	Deutério	fotomultiplicadora
<i>Cary 14</i>	VIS	Tungstênio	fotomultiplicadora
<i>Cary 14</i>	IV-p	Tungstênio	PbS
<i>CVI SM240</i>	UV	Deutério	CCD (Si)
<i>CVI SM240</i>	VIS	Tungsteno	CCD (Si)
<i>CVI SM240</i>	IV-p	Tungstênio	CCD (Si)
<i>Perkin Elmer</i>	IV-1	sulfeto de cádmio	lítio-tantalato (LiTaO ₃)

radiação solar direta tenha incidência normal. Esse procedimento permite medir o fluxo de radiação solar direta normal que atravessa a amostra, correspondendo ao numerador da Equação (1), ou seja,

$$I_a = \int_{\lambda_0}^{\lambda_f} \tau_n(\lambda) I_D(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

Portanto, cada resultado é composto por uma medida de irradiância solar direta e pela medida da irradiância solar que atravessa a amostra. Desse modo, a Equação (1) é reescrita para representar as medidas com um ângulo de incidência normal, e a banda do espectro solar que pode ser medida pelo pireliômetro, onde $\lambda_0 \cong 0,25 \mu\text{m}$ e $\lambda_f \cong 3,00 \mu\text{m}$:

$$\tau_{ns} = \frac{\int_{\lambda_0}^{\lambda_f} \tau_n(\lambda) I_D(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_0}^{\lambda_f} I_D(\lambda) d\lambda} \quad (5)$$

ou ainda, na forma como são representados os resultados medidos

$$\tau_{ns} = \frac{I_a}{I_D} \quad (6)$$

A atividade experimental pode ser resumida na seguinte rotina: (i) escolha de um dia de céu limpo, (ii) definição do conjunto de amostras a serem medidas, (iii) limpeza da superfície das amostras, (iv) regulagem do equipamento, (v) medição e registro da irradiância solar direta, (vi) medição e registro da irradiância solar que atravessa a amostra. Os

primeiros três itens representam uma fase de preparação, enquanto que os demais itens se referem às medições, cujos resultados são obtidos de acordo com a Equação (6).

O primeiro cuidado para que essa técnica forneça bons resultados é a observação das condições de nebulosidade favoráveis, caso contrário podem ocorrer significativas modificações temporárias na irradiância solar. Recentemente, a *CIE - Commission Internationale de l'Éclairage* [CIE, 2003], propôs uma padronização para as condições de luz do dia, onde são definidas quinze condições de nebulosidade, dentre as quais cinco representam diferentes condições de céu limpo [Darula, S. e Kittler, R., 2002]. Essas diferentes características dos céus limpos estão relacionadas com a presença de aerossóis na atmosfera, que provocam alterações na radiação circunsolar. Entretanto, tais diferenças podem ser desconsideradas para os propósitos deste trabalho. Além disso, poucas restrições foram estabelecidas em relação aos horários de medição, evitando-se principalmente os horários extremos, que correspondem a valores elevados de massa de ar. Isso é possível porque se trata de uma medida relativa, e assim basta que as condições de medição não se alterem significativamente entre o par de medições de I_D e I_a . Com as condições climáticas favoráveis, procede-se à limpeza das amostras para evitar que a poeira e outras impurezas depositadas na superfície prejudiquem os resultados.

Para iniciar a fase de medição, o pireliômetro deve ser ajustado de modo que a radiação solar tenha incidência normal. Essa condição é observada quando a radiação solar ilumina o centro do alvo do equipamento. Também é fundamental minimizar o intervalo de tempo entre as duas medidas que compõem um resultado, porque a irradiância solar direta normal que atravessa a amostra, I_a , é dependente de I_D , como evidencia a Equação (5). Por outro lado, o tempo

de medição deve ser suficiente para a estabilização das medidas adquiridas e registradas no multímetro. No decorrer da atividade experimental, é necessário realizar alguns ajustes na posição do pireliômetro com a finalidade de acompanhar o movimento do disco solar. Entretanto é importante destacar que o instrumento não deve ser ajustado durante as medições que compõem um resultado, pois essas medições, correspondentes às equações (3) e (4), devem ser realizadas sob mesmas condições e para a mesma irradiância solar direta normal. Antes de iniciar a medição desta grandeza, deve-se observar o alvo do pireliômetro.

Registrado o valor da irradiância solar direta normal, seguem-se a medição e o registro do fluxo de radiação solar que atravessa a amostra. A amostra deve ser posicionada de modo que a radiação solar tenha incidência normal.

Durante um dia de trabalho, são realizadas, três medições do par I_D e I_a , em seqüência, para cada uma das amostras. Esse procedimento é repetido em três dias diferentes, com o propósito inicial, no contexto da pesquisa, de verificar se as possíveis alterações atmosféricas seriam capazes de alterar significativamente os resultados. Assim, os valores da transmitância solar normal para os policarbonatos e películas aplicadas sobre vidros são obtidos a partir da média de um conjunto de nove medidas realizadas em três dias diferentes.

B. Estimativa da incerteza

De forma rigorosa, a incerteza nas medições realizadas com pireliômetros não depende apenas da calibração do instrumento, mas também de fatores que são inerentes à sua construção. Fatores térmicos, espectrais, entre outros, podem influenciar as medições. Por exemplo, o sinal de saída da termopilha depende da sua temperatura, isso é, da temperatura ambiente. No *Eppley NIP*, um circuito de compensação térmica é usado, limitando a variabilidade em $\pm 1\%$ no intervalo entre -20°C a 40°C . Efeitos espectrais podem estar relacionados aos materiais empregados na janela e no revestimento da termopilha. Além disso, a abertura angular do pireliômetro pode ultrapassar os limites do disco solar, realizando medições de uma fração da radiação circunsolar. Entretanto, todas estas possíveis imperfeições dão origem a erros que podem ser desprezados para quase a totalidade das aplicações.

Outros fatores que podem influenciar as medições são de mais fácil correção, por exemplo: o posicionamento do pireliômetro em relação ao disco solar; o tempo necessário para o instrumento entrar em equilíbrio térmico com o ambiente, ou pelo menos para minimizar essa diferença; as conexões entre o pireliômetro e o voltímetro, que podem provocar efeito termopar, aumentando a tensão de saída.

De acordo com a Equação (6), o mensurando é obtido a partir da razão entre a fração do fluxo de radiação solar direta normal que atravessa a amostra, I_a e o fluxo de radiação solar direta normal, I_D , portanto:

$$\overline{\tau_{ns}} = f(I_a, I_D) = \frac{\overline{I_a}}{\overline{I_D}} \quad (7)$$

onde $\overline{\tau_{ns}}$, $\overline{I_D}$ e $\overline{I_a}$ representam a média das grandezas correspondentes, obtida por uma seqüência de medições.

Todas as estimativas de entrada são correlacionadas, com coeficiente de correlação igual ou aproximadamente igual a um, mostrando que as grandezas, I_D e I_a , são dependentes entre si.

Portanto, a expressão geral para a variância padrão combinada, μ_c^2 , é

$$\mu_c^2 = \left[\sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \mu(x_i) \right]^2 \quad (8)$$

onde $\mu(x_i)$ é incerteza padrão da estimativa de entrada x_i . Assim, a incerteza padrão é calculada através de uma soma linear dos termos, ou seja,

$$\mu_c = \left| \frac{\partial \overline{\tau_{ns}}}{\partial I_a} \mu(I_a) + \frac{\partial \overline{\tau_{ns}}}{\partial I_D} \mu(I_D) \right| \quad (9)$$

C. Tratamento de dados das medidas espectrais

De acordo com a Equação (5), obtém-se a transmitância solar normal, resultante de medições com espectrofotômetros, T_{ns} , pela integração de dados espectrais de transmitância, $\tau_n(\lambda)$, e dados espectrais de irradiância solar direta.

Durante a pesquisa foram empregados, como dados de entrada, diferentes distribuições espectrais de irradiância solar, para obtenção dos valores de $I_D(\lambda)$. As distribuições espectrais caracterizadas por modelos de simulação, como por exemplo, Brine and Iqbal, Leckner, Bird, R. E. and Hutstrom R. L., 1981, permitem a obtenção de valores de $I_D(\lambda)$ a partir da alteração de um conjunto de parâmetros atmosféricos ou relacionados aos sensores de silício [Rossini, 1997], que podem representar uma estimativa da máxima irradiância disponível. Também é possível empregar as normas: (i) *ASTM E891-87*, para representar os valores de irradiância espectral solar direta normal, e (ii) *ASTM E892-87*, para representar os valores de irradiância espectral solar global numa superfície com inclinação de 37° . Ambos os casos utilizam condições externas com massa óptica relativa de ar $AM = 1,5$. Concluiu-se que a melhor caracterização das condições externas é obtida pela norma *ASTM E891-87*.

Para obtenção dos valores de T_{ns} desenvolveu-se um algoritmo para integração numérica dos dados e apresentação dos resultados. O programa tem como dados de entrada os arquivos contendo os valores de transmitância espectral, $\tau_n(\lambda)$, de cada amostra e o arquivo contendo os dados de distribuição espectral da irradiância solar direta, para uma atmosfera em condições padronizadas, $I_D(\lambda)$.

Com estes dados, o programa fornece como saída o valor da transmitância solar, visível e infravermelha, para uma amostra ou para um conjunto de amostras, de acordo com o código escolhido. A integração numérica é realizada pela regra de Simpson, descrita em textos básicos [Hornbeck, 1975]. Todos os arquivos que contém os dados de entrada cobrem a região

Tabela 4: Transmitância solar normal para amostras de vidros.

Cód.	$\overline{I_D}$ (mV)	$\overline{I_a}$ (mV)	$\overline{\tau_{ns}}$
<i>incolor 2,5 mm</i>	7,46	6,52	$0,87 \pm 0,02$
<i>incolor 3,0 mm</i>	7,57	6,50	$0,86 \pm 0,02$
<i>incolor 4,0 mm</i>	7,50	6,33	$0,84 \pm 0,02$
<i>incolor 5,0 mm</i>	7,48	6,19	$0,83 \pm 0,02$
<i>fumê 4,0 mm</i>	7,45	4,08	$0,55 \pm 0,02$

Tabela 5: Transmitância solar normal para amostras de policarbonatos.

Cód.	$\overline{I_D}$ (mV)	$\overline{I_a}$ (mV)	$\overline{\tau_{ns}}$	T_{ns}
<i>Cristal</i>	7,52	6,04	$0,80 \pm 0,02$	$0,79 \pm 0,01$
<i>Azul</i>	7,90	5,75	$0,73 \pm 0,02$	$0,74 \pm 0,01$
<i>Verde</i>	7,90	5,53	$0,70 \pm 0,02$	$0,70 \pm 0,01$
<i>Cinza</i>	7,67	4,13	$0,54 \pm 0,02$	$0,55 \pm 0,01$
<i>Bronze</i>	7,80	4,00	$0,51 \pm 0,02$	$0,52 \pm 0,01$
<i>cinza escuro</i>	7,58	2,48	$0,33 \pm 0,02$	$0,33 \pm 0,01$

do espectro solar que pode ser medida pelo pireliômetro *Eppley NIP*, isto é, entre $0,25 \mu\text{m}$ e $3,0 \mu\text{m}$.

V. RESULTADOS E ANÁLISE

Os primeiros resultados, conforme a Tabela 4, foram obtidos para amostras de vidro incolor em um único dia de medição. Inicialmente, os valores de transmitância solar normal, medidos com o pireliômetro *NIP*, foram confrontados com valores apresentados na literatura e em outras fontes, para amostras de mesma espessura. Os valores de irradiância solar direta normal e do fluxo de radiação solar direta normal que atravessa a amostra representam uma média de medições realizadas em um único dia.

Em seguida, o resultado das medições para a amostra de vidro *fumê* foi comparado com o resultado obtido através das medições realizadas com os espectrofotômetros, T_{ns} . Esses resultados indicaram uma boa concordância entre as duas técnicas, sendo $T_{ns} = 0,56 \pm 0,01$.

A Tabela 5 apresenta os resultados de seis amostras de policarbonato do tipo *Lexan XL10*. A Tabela 6 apresenta os resultados de seis amostras de diferentes películas aplicadas sobre vidros. Na primeira coluna um código identifica cada amostra; entretanto as indicações da coloração não têm qualquer correspondência entre diferentes grupos de amostras. Todas as medições foram realizadas de acordo com a rotina da atividade experimental resumida na Seção 4. Os resultados τ_{ns} , medidos com o pireliômetro, são comparados com a integração dos valores espectrais medidos com espectrofotômetros, sob condições de uma atmosfera padrão. Cada resultado de T_{ns} é considerado como valor de referência da transmitância solar normal.

Os resultados da Tabela 6 indicam que a técnica pireliométrica superestimou os valores de transmitância solar à incidência normal. Entretanto, esse comportamento não é observado em relação aos outros grupos de amostras. A comparação menos satisfatória entre as duas técnicas foi observada para a amostra de *PR35-SIR (prata)*. As demais

comparações evidenciam que foi alcançada uma boa concordância entre resultados das diferentes técnicas.

VI. CONCLUSÕES

Foram realizadas medições de transmitância solar à incidência normal de materiais semitransparentes, comercializados no mercado nacional. O método experimental empregou um pireliômetro de primeira classe para propiciar experimentos em condições externas e com rápida medição global em banda larga.

Para avaliar os resultados pireliométricos foram realizadas medições da transmitância espectral normal com uma família de espectrofotômetros. As curvas por eles produzidas, juntamente com os dados espectrais de uma atmosfera padrão, foram integradas para obtenção da transmitância solar normal, cujos resultados foram considerados como valores de referência.

A análise comparativa entre as duas técnicas demonstrou que as medições realizadas adequadamente com um pireliômetro de primeira classe apresentam boa qualidade para um grande número de aplicações envolvendo matérias semitransparentes com baixo espalhamento luminoso.

Para materiais com superfícies rugosas ou irregulares que apresentam espalhamento mais acentuado, como vidros jateados e policarbonatos alveolares, torna-se necessária a utilização de esfera integradora, com a qual novos estudos estão sendo iniciados.

Agradecimentos

Este trabalho contou com apoio do CNPq, através do projeto "Metrologia óptica de materiais e filmes seletivos para eficiência energética de interiores" e contando com a participação da equipe do LAFRIG – Laboratório de Vapor e Refrigeração da Engenharia Mecânica da UFRGS, coordenada pelo Prof. Paulo O. Beyer, particularmente Fábbyo Luiz Pereira e Alexandre O. Schwieder. Agradecemos também a

Tabela 6: Transmittância solar normal para amostras de películas.

Cód.	\bar{I}_D (mV)	\bar{I}_a (mV)	$\bar{\tau}_{ns}$	T_{ns}
PR35-SIR (prata)	6,18	1,38	0,22 ± 0,02	0,19 ± 0,01
SG (cinza claro)	7,15	1,32	0,18 ± 0,02	0,18 ± 0,01
PR20-SIR (prata)	8,29	1,25	0,15 ± 0,02	0,14 ± 0,01
BS (bronze)	7,14	0,91	0,13 ± 0,02	0,12 ± 0,01
PP20-BRDF (azul)	6,11	0,78	0,13 ± 0,02	0,11 ± 0,01
S20 (prata)	7,13	0,91	0,13 ± 0,02	0,11 ± 0,01

Edison G. Rossini, Jorge Waskow, assim como aos arquitetos Jeane Di Primio e Giovani B. Azambuja, pelo fornecimento de amostras. Somos também gratos às contribuições de Cássio Bento de Andrade, Daniel Scain Farenze e Alexandre Gregoski no Laboratório de Energia Solar, assim como de Marcelo B. Pereira, Júlio R. Schoffen, Marcelo M. Marchiori, Maurício P. B. Susin e Roberto S. Ribeiro no Laboratório Laser&Óptica. Finalmente, agradecemos a Michele e ao coordenador Carlos A. Ferreira pelas medições no infravermelho longínquo no LAPOL – Laboratório de Materiais Poliméricos da UFRGS.

Referências

- Athienitis, A. K. and Tzempelikos, A., A methodology for simulation of daylight room illuminance distribution and light dimming for a room with a controlled shading device. *Solar Energy*, vol. 72, n. 4, 271-281, 2002.
- Pereira, F. L. Beyer, P. O., Schwieder, A. O., Avaliação da influência termo-energética de parâmetros físicos em uma edificação com condicionamento de ar. - MERCOFRIO 2004, Congresso de ar condicionado, refrigeração, aquecimento e ventilação do mercosul, 2004.
- Pereira, F. L., Avaliação da influência termo-energética de parâmetros físicos em uma edificação. Dissertação de Mestrado. PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 2005.
- Karlsson, J., Karlsson B., Roos, A., A simple model for assessing energy performance of windows. *Energy and Buildings*, vol. 33, n. 7, 641-651, 2001.
- International Standard, ISO 9050: Glass in buildings – Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance and ultraviolet transmittance, and related glazing factors, ISO, 1990.
- American Society for Testing and Materials, ASTM D 1003-00: Standard test method for haze and luminous transmittance of transparent plastics, 2000.
- International Standard, ISO 9211-2:1994, Optics and optical instruments – optical coatings – Part 2: Optical properties, ISO, 1994.
- Henninger, R. H., Witte, M. J., Crawley, D. B., Analytical and comparative testing of EnergyPlus using IEA HVAC BESTEST E100-E200 test suit. *Energy and Buildings*, vol. 36, n. 8, 855-863, 2004.
- Grings, E. T. O., Comparação entre resultados computacionais e experimentais do comportamento térmico de um ambiente. Dissertação de Mestrado. PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 2003.
- EnergyPlus (a), EnergyPlus engineering document – The reference to EnergyPlus calculations, 2002.
- Winkelmann, F. C., Modeling windows in EnergyPlus, Buildings Simulations, Rios de Janeiro, 2001.
- EnergyPlus (b), Input output reference – The encyclopedic reference to EnergyPlus input and output, 2002.
- American Society for Testing and Materials, ASTM E891-87: Standard tables for terrestrial direct normal solar spectral irradiance for air mass 1.5, 471-476, 1987.
- Guia para a expressão da incerteza de medição, 2ª edição revisada, ABNT e INMETRO, Rio de Janeiro, 1998.
- Kratzemberg, G. K., Colle, S., Pereira, E. B., Manteli Neto, S. L., Beyer, H. G., Abreu, S. L., Rastreabilidade de radiômetros para medições da energia, Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM), Recife, 2003
- Kepler, R. O., Caracterização de materiais para cobertura em coletores solares, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 1978. Dissertação.
- Johnson, R., Sullivan, R., Selkowitz, S., Nozaki, S., Conner C., Arasteh D., Glazing energy performance and design optimization with daylighting, *Energy and Buildings* Vol. 6, n. 4, 305-317, 1984.
- Coulson, K. L., Solar terrestrial radiation – methods and measurements, Academic Press, New York, 322 p, 1975.
- Iqbal, M., An introduction to solar radiation, Academic Press, Toronto, 390 p., 1983.
- CIE – Spatial distribution of daylight – CIE standard general sky – Standard CIE S 011/E:2003, 2003.
- Darula, S. e Kittler, R., CIE general sky standard luminance distributions, The canadian conference on building energy simulation – proceedings of eSim, 2002.
- Brine, D. T, Iqbal, M. Diffuse and global solar spectral irradiance under cloudless skies, *Solar Energy*, vol. 30, n. 5, 447-453, 1983.
- Leckner, B, The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface – elements of a model, *Solar Energy*, vol. 20, 143-150, 1978.

Bird, R. E., Hutstrom R. L., A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces, Solar Energy Research Institute - SERI/TR, 642-761, 38 p., 1981.

Rossini, E., Caracterização do espectro solar com um mínimo de filtros, Dissertação de Mestrado. PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 1997.

American Society for Testing and Materials, ASTM E892-87: Terrestrial solar spectral irradiance at air mass for 1.5 for a 37 ° tilted surfaces, 477-484, 1987.

Hornbeck, R. W., Numerical methods. Quantum Publishers, 1975.