

## OBTENÇÃO DE PROPRIEDADES RADIATIVAS ESPECTRAIS DE VIDRO PLANO

**Vicente de Paulo Nicolau**, vicente@lmpt.ufsc.br  
**Fernando Pires Maluf**;  
**Fabiano José Balen**.

Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Mecânica.  
Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas  
C.P 476 - 88010-970 - Florianópolis, SC, Brasil

***Resumo.** Neste artigo são identificadas as propriedades radiativas espectrais de amostras de vidro plano, como o índice de refração e o coeficiente de absorção. A identificação ocorre nas regiões visível e infravermelha do espectro eletromagnético e é realizada a partir de medidas de transmitâncias e reflectâncias para uma amostra de determinada espessura. Diferentes espessuras são ensaiadas. A bancada experimental completa, o modelo de identificação, bem como alguns resultados são apresentados e discutidos neste artigo.*

***Palavras-chave:** Transmitância, Reflectância, Propriedades Radiativas, Propriedades Térmicas, Radiação Térmica.*

### 1. INTRODUÇÃO

O uso de programas de simulação térmica para avaliar o desempenho de edificações tem sido necessário para melhorar o seu desempenho térmico. Novos materiais têm sido incorporados, seguindo aspectos econômicos e estéticos. Para estes novos materiais e também para os antigos aplicados em novas situações, torna-se imperativo o conhecimento de suas propriedades térmicas para alimentar esses programas de simulação.

Em geral, dados para painéis completos de vidro são encontrados na forma de transmitâncias e de reflectâncias, os quais são específicos para cada painel. Entretanto o acesso aos dados intrínsecos dos materiais, como o índice de refração  $n$  e o coeficiente de absorção  $a$  seria mais interessante, permitindo estender o cálculo para outras situações que usam o mesmo material, com diferentes espessuras e ângulos de incidência. Apenas em alguns casos os materiais são tão particulares, que esta generalização não seria possível.

Trabalhos recentes têm indicado várias direções, com alguns considerando as propriedades intrínsecas, outros considerando a análise do sistema completo de janela. Uma

listagem com várias publicações é apresentada por Nicolau e Balen (1999). Entre as publicações sobre a determinação dessas propriedades pode-se citar o trabalho de Rubin (1985), que utilizou um espectrômetro a transformada de Fourier para medir reflectâncias e transmitâncias de diferentes tipos de vidros de janela. As relações de Kramers-Krönig são adotadas para calcular as partes reais e imaginárias do índice de refração. Dados são fornecidos para a faixa de 0,3 a 90  $\mu\text{m}$ . Dados de transmitância, reflectância e absorvância são também fornecidos.

Por sua vez, Hunter(1985) apresenta uma lista feita por Humpreys-Owen de nove métodos nos quais  $n$  e  $a$  podem ser obtidos a partir de medidas de reflectâncias em incidência oblíqua na região ultravioleta. Estes métodos são divididos em duas classes: (1) medição de duas reflectâncias em um ângulo de incidência ou uma reflectância em dois ângulos de incidência; (2) medição de uma reflectância em qualquer ângulo de incidência como o ângulo de Brewster ( $n=\tan\theta_B$ ). Uma série de figuras mostram os erros estimados que acompanham o método usado.

Aspnes (1985) faz algumas observações gerais sobre as relativas vantagens e desvantagens da reflectometria e da elipsometria. Como quantidades mais complexas estão envolvidas, um elipsômetro é mais complicado que um refletômetro. Este mede apenas intensidades ou potência luminosa, refletidas ou transmitida, enquanto o elipsômetro trabalha com intensidades e estado de polarização dos feixes incidentes e refletidos. Conclui o mesmo que o elipsômetro apresenta o melhor desempenho e acrescenta uma série de comentários sobre esta técnica.

Neste artigo apresenta-se um processos de identificação usados na obtenção do índice de refração e do coeficiente de absorção. O processo baseia-se em medidas de transmitância e reflectância de uma amostra de vidro plano. Na seqüência a formulação do processo de identificação é apresentada e resultados para diferentes espessuras de amostras são comparados. O aparato experimental é também apresentado e discutido.

## 2. FORMULAÇÃO

A reflexão de um feixe incidente, não polarizado, sobre um meio dielétrico é governada pelo modelo apresentado por Fresnel (Siegel e Howell, 1992), “Eq. (1)” seguinte.

$$\rho(\theta) = \frac{1}{2} \frac{\sin^2(\theta - \chi)}{\sin^2(\theta + \chi)} \left[ 1 + \frac{\cos^2(\theta + \chi)}{\cos^2(\theta - \chi)} \right], \quad (1)$$

onde  $\theta$  é o ângulo de incidência, igual ao ângulo de reflexão para a reflexão especular e  $\chi$  é o ângulo de refração. A relação entre os ângulos é dada pela Lei de Snell, “Eq. (2)”. O meio sólido é considerado como um dielétrico perfeito, com um índice de refração  $n$ . O ar envolvente tem um índice de refração aproximadamente igual à unidade.

$$\frac{\sin\theta}{\sin\chi} = n \quad (2)$$

Após ter sido refratado, o raio será progressivamente atenuado no interior do meio, formado por uma placa plana de espessura  $L$  e coeficiente de absorção  $a$ . Para uma única passagem do raio pelo meio, a Lei de Beer (também chamada Lei de Bouguer), pode ser usada.

$$\tau = \exp(-aL / \cos \chi) \quad (3)$$

Considerando a amostra plana com múltiplas reflexões nas interfaces, a transmitância  $T$  e a reflectância  $R$  (Siegel e Howell, 1992) são representadas como:

$$T = \frac{\tau(1-\rho)^2}{1-\rho^2\tau^2} \quad (4)$$

$$R = \rho \left[ 1 + \frac{(1-\rho)^2\tau^2}{1-\rho^2\tau^2} \right] = \rho(1+\tau T) \quad (5)$$

### 3. IDENTIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES

As propriedades intrínsecas necessárias para caracterizar um material semitransparente, não difusor, são o índice de refração  $n$  e o coeficiente de absorção  $a$ . Com estas propriedades os efeitos globais de um feixe incidente sobre uma ou mais folhas desse material podem ser previstos usando-se as equações apresentadas acima. Um exemplo típico é a previsão dos valores de transmitância e de reflectância para um comprimento de onda particular ou uma faixa de comprimentos de onda, para uma dada espessura de amostra e um dado ângulo de incidência.

No processo de identificação a espessura ótica  $aL$  pode substituir o coeficiente de absorção  $a$ , sem nenhum esforço adicional. Na verdade a propriedade do material é o coeficiente de absorção, porém a espessura ótica é uma grandeza adimensional, sendo mais adequada para uso durante a medição e a identificação. Para a identificação das propriedades as transmitâncias e as reflectâncias são medidas para um ângulo particular de incidência e para um determinado comprimento de onda. A refletividade  $\rho$  pode ser isolada da “Eq. (5)” e substituída na “Eq. (4)”. Assim a seguinte equação envolvendo  $R$ ,  $T$  e  $\tau$ , pode ser obtida:

$$T - \frac{R^2\tau^2 T}{(1+\tau T)^2} - \tau + \frac{2\tau R}{1+\tau T} - \frac{\tau R^2}{(1+\tau T)^2} = 0 \quad (6)$$

Considerando que a “Eq. (6)” está na forma implícita, pode-se utilizar o método de Newton-Raphson para identificar a transmissividade  $\tau$ . Com  $\tau$  identificado,  $\rho$  pode ser determinado pela “Eq. (5)”. Uma nova identificação é processada usando-se a “Eq. (1)” e novamente o método de Newton-Raphson para obter o ângulo de refração  $\chi$ . Em seguida, usando-se a Lei de Snell, “Eq. (2)” calcula-se o índice de refração  $n$ . Finalmente a Lei de Beer pode ser usada para a determinação da espessura ótica  $aL$  e do coeficiente de absorção  $a$ .

### 4. MONTAGEM EXPERIMENTAL

A montagem experimental é baseada no uso de um monocromador para a obtenção do feixe monocromático para a medição no comprimento de onda desejado. Um esquema é apresentado na “Fig. 5”, com os componentes necessários à obtenção da transmitância normal. Seguindo o feixe, o primeiro elemento da montagem é a fonte de radiação, que no

visível e infravermelho próximo é uma lâmpada de tungstênio e um elemento cerâmico no infravermelho médio. Estas fontes são aquecidas eletricamente por uma fonte DC estabilizada, de modo a ter um controle mais preciso sobre as suas temperaturas. O feixe de radiação emitido é refletido pelo espelho esférico EE, sobre a fenda de entrada do monocromador. Um modulador formado por um disco de pás planas corta o feixe de radiação, modulando este feixe. O monocromador tem por base o uso de redes de difração de modo a separar os diversos comprimentos de onda através de interferência. Assim, apenas uma faixa estreita, em torno de um certo comprimento de onda, pode passar pela fenda de saída. O feixe de saída é ainda desviado por um segundo espelho esférico em direção ao detector. A amostra é então colocada antes deste, de modo que a relação do sinal obtido com a amostra, pelo sinal obtido sem a amostra é a própria transmitância. O sinal obtido sem a amostra representa a radiação incidente. O mesmo princípio é usado na medição de refletividade, onde o goniômetro é usado para selecionar o ângulo de medição na reflexão. Neste caso a amostra também é girada de forma independente do braço que sustenta o detector, sendo necessário duas mesas giratórias comandadas por motores a passo. O sistema de medição baseado na modulação do feixe de radiação, chamado de “lock-in”, permite efetuar a medição apenas dentro da frequência de modulação, de modo que a radiação ambiente bem como a emitida pela amostra não afetem os resultados.

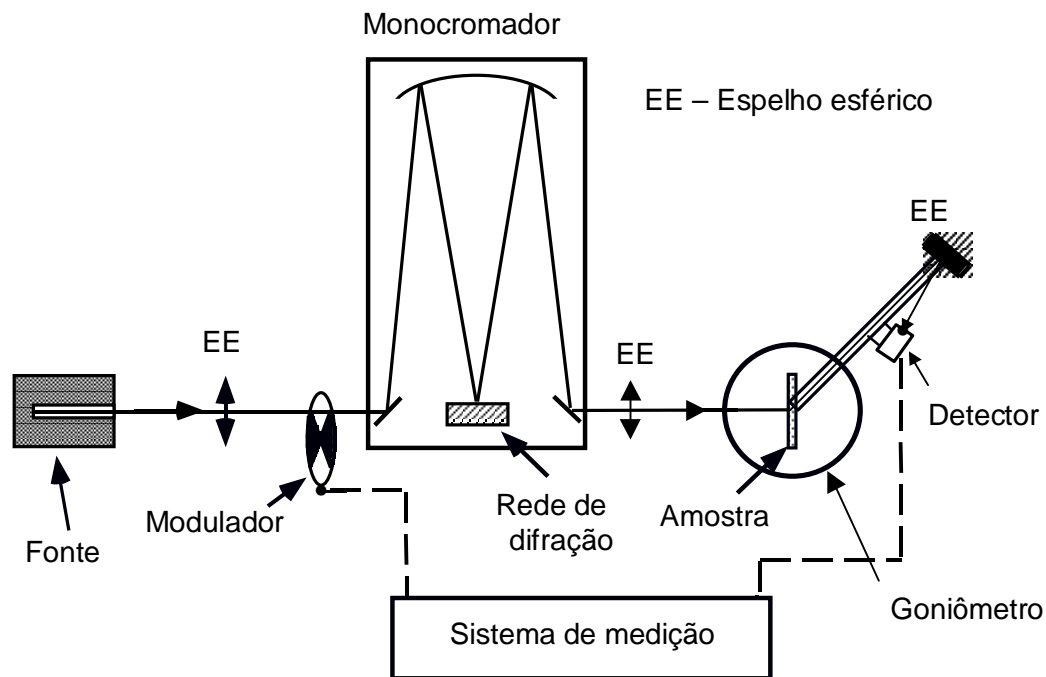


Figura 1 - Montagem experimental com o monocromador e o goniômetro.

A resolução do feixe em comprimento de onda é determinada pela abertura das fendas do monocromador: quanto mais larga a fenda, menor a resolução em comprimento de onda e também menor a parcela de energia a ser detectada. Uma maior abertura aumenta o sinal a ser detectado, pois permite uma banda mais larga deixar o monocromador, significando uma

maior quantidade de energia. Uma região espectral mais larga pode ser coberta com o monocromador usando diferentes redes de difração, as quais devem ser mudadas uma a uma, conforme as suas regiões de atuação. Em geral a resolução é melhor do que a necessária, o grande problema sendo a falta de energia no detector. Para cobrir a faixa visível e infravermelha ao mesmo tempo, apenas o detector piroelétrico pode ser usado, mas a sua detectividade é mais baixa do que os demais detectores que se aplicam apenas a determinadas faixas de comprimento de onda. Um outro problema ocorre com a própria rede de difração, que selecionada para um comprimento de onda  $\lambda$ , deixa passar os submúltiplos, como  $\lambda/2$ ,  $\lambda/3$ ,  $\lambda/4$ , etc. Filtros tipo passa-alto devem ser usados para impedir a passagem desses comprimentos de onda menores.

## 5. RESULTADOS

Os resultados foram obtidos para amostras de vidro comercial claro, com três espessuras diferentes. As três espessuras são 3mm, 5mm e 8mm. A “Fig. 2” mostra os resultados de transmitâncias para o espectro visível e o infravermelho até 4200 nm. Conforme esperado, uma maior transparência é obtida para amostras mais finas e uma grande redução na transmitância ocorre acima de 2600 nm.

Na “Fig. 3” compara-se os resultados para amostras de 3 mm, com os valores apresentados por Ismail e Henríquez (1999) e Hsieh e Su (1979). Os resultados de Caram (1999), são para uma amostra de 6 mm. Apesar de serem amostras de origens diferentes, os resultados são bastante próximos, com o mesmo comportamento espectral.

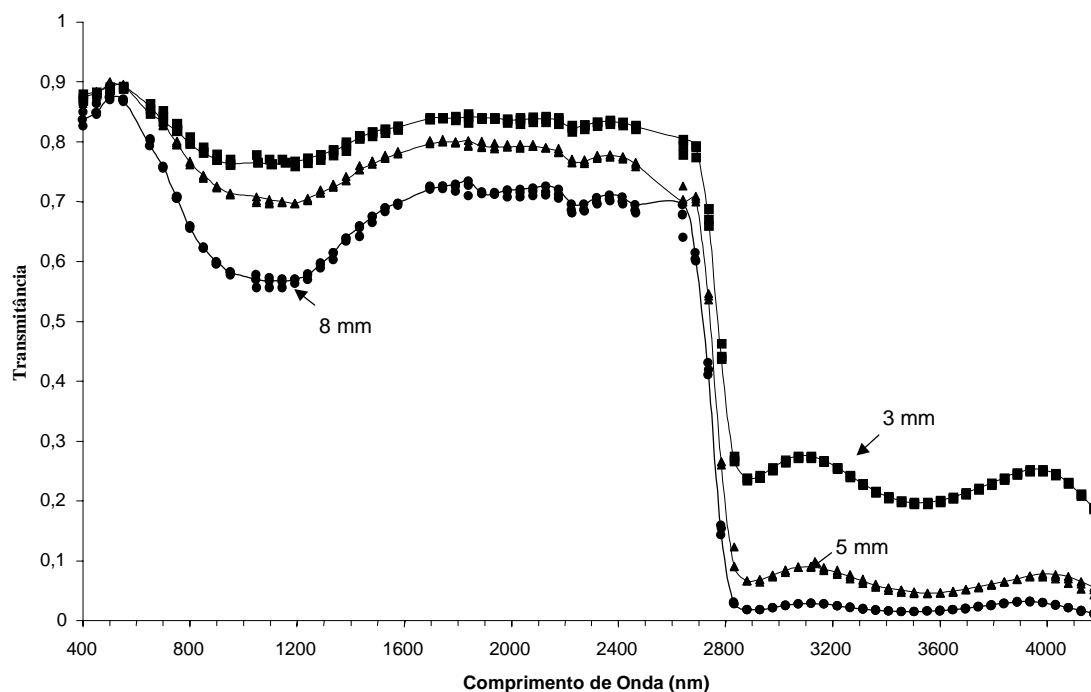


Figura 2 – Transmitâncias para diferentes espessuras de amostras ( $\theta = 5^\circ$ ).

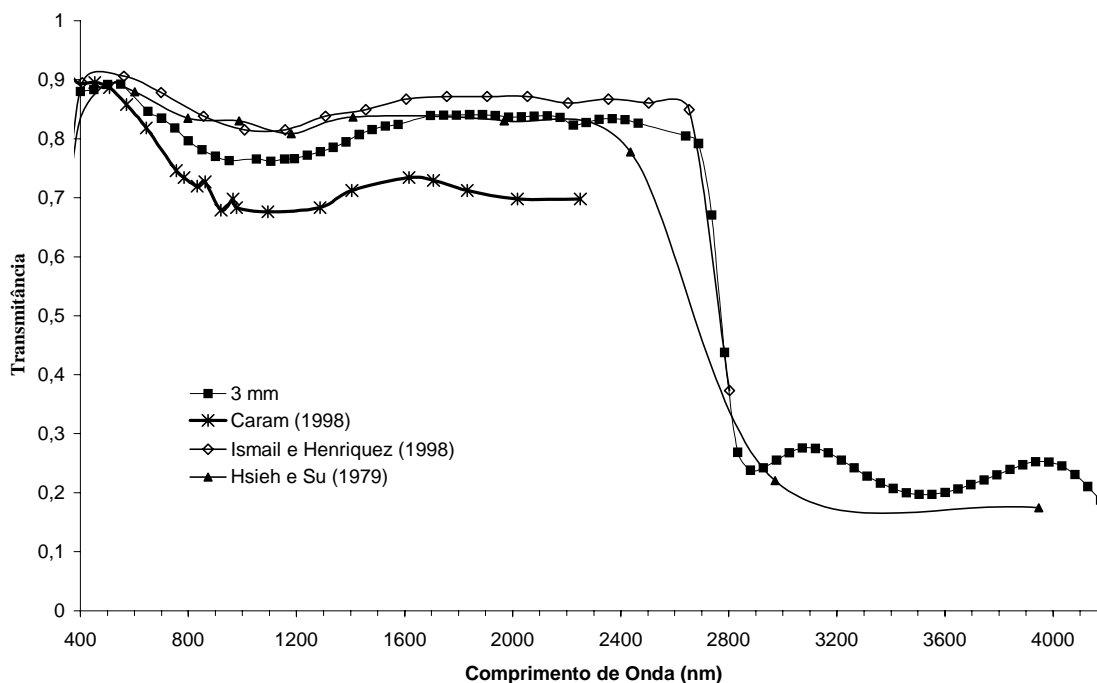


Figura 3 – Comparação dos resultados de transmitâncias.

Na “Fig. 4” são apresentados os resultados de reflectâncias para diferentes espessuras de amostras, para um ângulo de incidência de  $5^\circ$ . Como estão incluídas as reflexões na superfície frontal e na superfície posterior da amostra, uma maior reflectância é esperada para a amostra de 3 mm. Nesta, o menor comprimento percorrido pelo feixe dentro da amostra resulta em uma menor absorção interna e portanto, em uma maior reflectância na sua totalidade. As refletividades das interfaces, dadas pela “Eq. 1”, são idênticas, não dependendo da espessura da amostra. Uma certa dispersão nos resultados é observada para cada amostra, em consequência das dificuldades de se conseguir sempre uma boa precisão de rotação do goniômetro que movimenta o detector. Como a reflexão é especular, qualquer pequeno desvio angular representa uma grande variação no sinal medido. Na “Fig. 5” as reflectâncias para uma amostra de 3 mm são comparadas com os resultados de Hsieh e Su (1979), observando-se uma boa concordância em toda a região espectral considerada.

Com os resultados de transmitâncias e reflectâncias apresentados nas figuras anteriores, obtém-se as distribuições espectrais para as variáveis índice de refração e coeficiente de absorção do material componente das amostras de vidro analisadas. Para o índice de refração, os resultados são mostrados na “Fig. 6”. O índice de refração apresenta um comportamento espectral semelhante ao publicado por Rubin (1985). No entanto ainda se observa uma grande dispersão dos resultados, sendo que espessuras maiores resultam em valores maiores de  $n$ , apesar do material componente ser o mesmo. Sabe-se que a reflectância tem maior influência na identificação do índice de refração, à partir de uma análise das equações envolvidas. Como já foi comentado, a medição da reflectância apresenta maiores dificuldades, pelo fato de se tratar de reflexão especular, onde qualquer desvio angular no posicionamento do detector implica em elevados erros na reflectância.

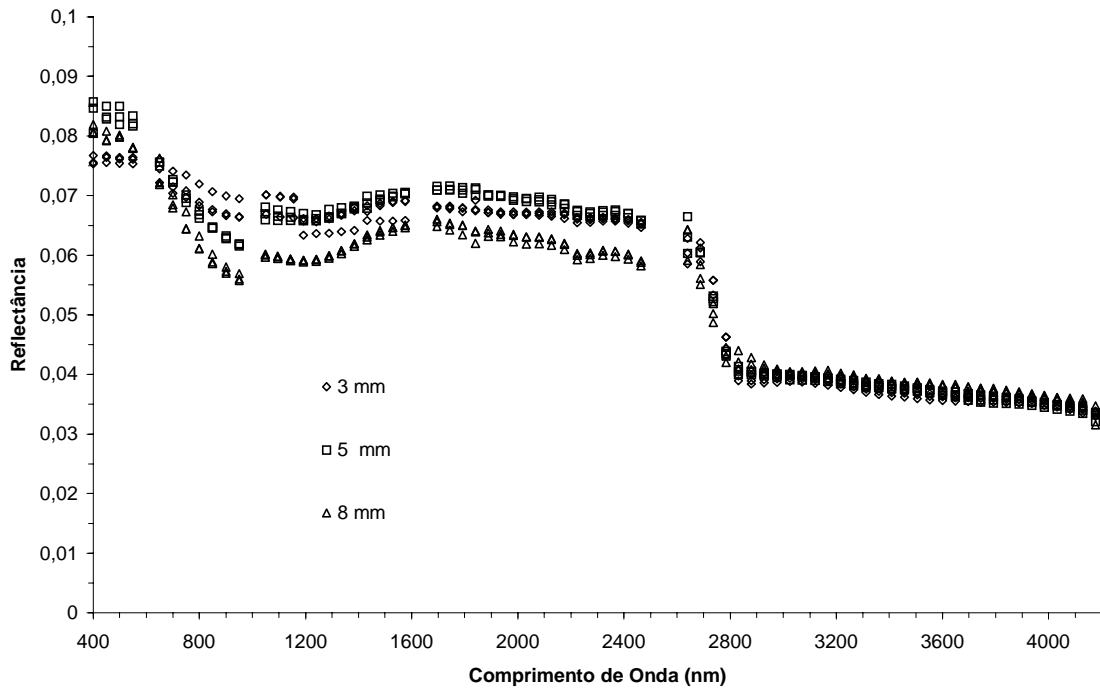


Figura 4 - Reflectâncias para diferentes espessuras de amostras.

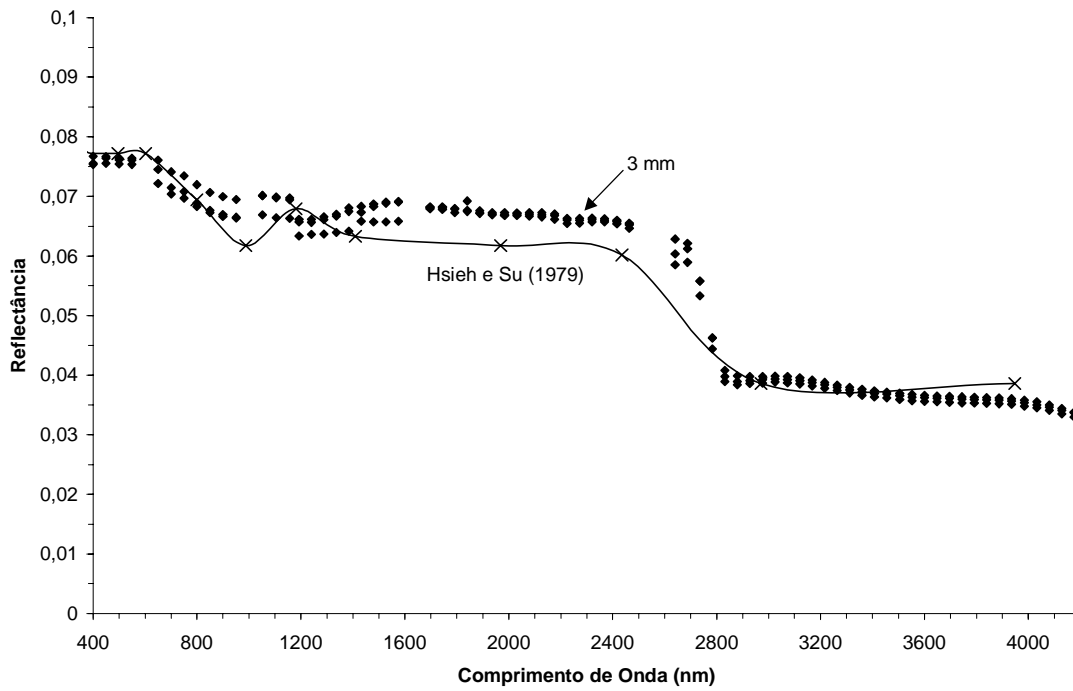


Figura 5 – Comparação dos resultados das reflectâncias.

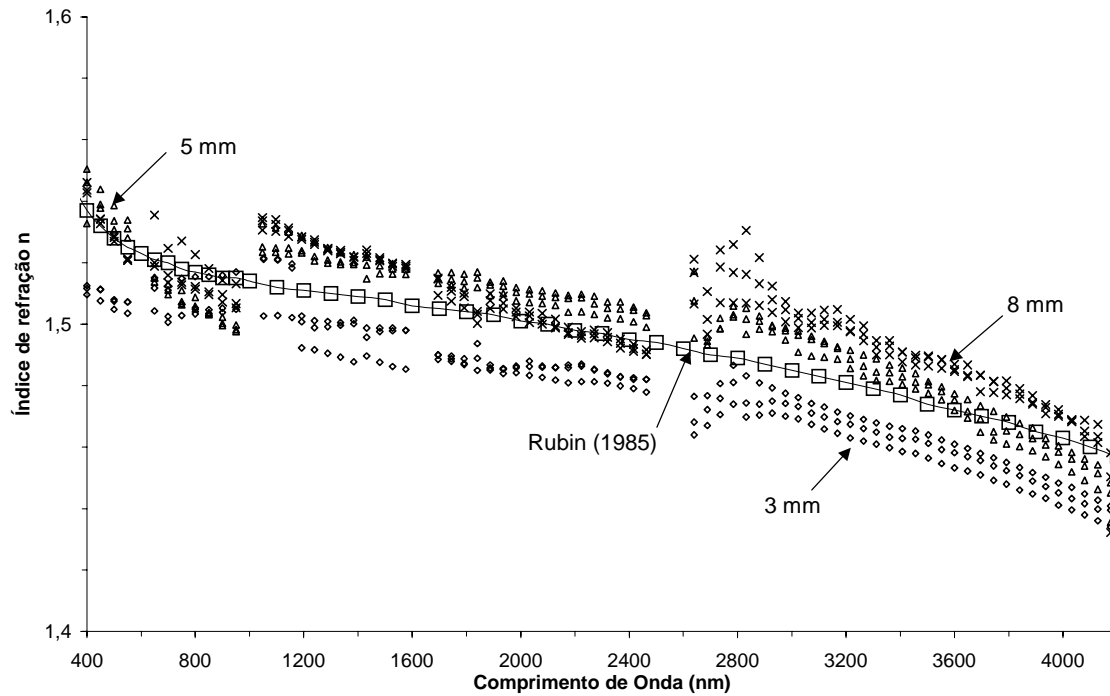


Figura 6 – Resultados obtidos para o índice de refração  $n$ , com amostras de diferentes espessuras.

Na “Fig. 7” são mostrados os resultados obtidos para as amostras de diferentes espessuras. Estes resultados são comparados com os resultados de Rubin (1985). Os resultados são coincidentes para a região de maior transparência, formada pela região visível e infravermelha próxima. Na região espectral seguinte, a absorção já é maior, havendo uma boa concordância entre os resultados para as diferentes espessuras. Uma certa dispersão é observada, devendo-se principalmente às dispersões na medição das transmitâncias. As dispersões nas transmitâncias possuem maiores influências nas dispersões do coeficiente de absorção para valores menores deste último, em função do modelo exponencial utilizado (“Eq. (3)”). Os resultados de Rubin (1985), estão um pouco abaixo, indicando um material de maior absorção nessa região.

## 7. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados indicam que o método fornece bons resultados na identificação do índice de refração e do coeficiente de absorção de amostras de vidro plano. Certas dificuldades foram ainda encontradas na medição das reflectâncias, mas podem ser reduzidas com uma redução das folgas do goniômetro, de forma que permita um melhor posicionamento angular do detector.

O método em si tem a grande vantagem de permitir a generalização dos resultados de transmitâncias e reflectâncias obtidos para uma amostra, com uma certa espessura e um determinado ângulo de incidência. Com a identificação do índice de refração e do



coeficiente de absorção, pode-se utilizar os modelos descritos e calcular as transmitâncias e reflectâncias para qualquer amostra, para quaisquer espessuras e ângulos de incidência. Este procedimento reduz bastante o trabalho experimental, uma vez que apenas um conjunto de medições é executado para um vidro de uma determinada composição.

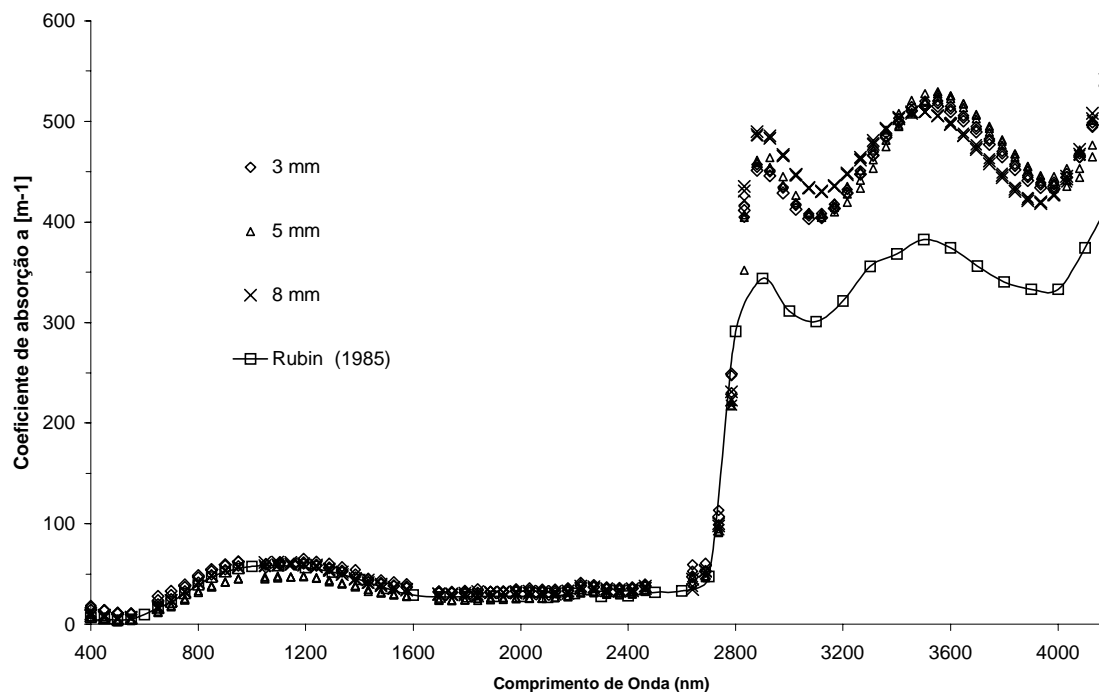


Figura 7 – Coeficiente de absorção obtido com diferentes espessuras de amostras.

### *Agradecimentos*

Este trabalho foi parcialmente financiado com recursos do CNPq, Processo n<sup>o</sup> 520500/98-9.

### **REFERÊNCIAS**

- Aspnes, D. E., 1985, The accurate determination of optical properties by ellipsometry, ed. Palik E D, Handbook of optical constants of solids, Academic Press, New York.
- Caram, R.M.,1998, Caracterização ótica de materiais transparentes e sua relação com o conforto ambiental em edificações, Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, SP.
- Hsieh, C. K.and Su, K. C, 1979, Thermal radiative properties of glass from 0.32 to 206 $\mu\text{m}$ , Solar Energy, vol. 22, pp. 37-43.
- Hunter, W. R., 1985, Measurement of optical constants in the vacuum ultraviolet spectral region, ed. Palik E. D., Handbook of optical constants of solids, Academic Press, N.Y.
- Ismail, K.A.R. and Henríquez, J.,R., 1998, U-values, optical and thermal coefficients of composite glass systems, Solar Energy Materials & Solar Cells, vol. 52, pp. 155-182.

Nicolau, V.P. and Balen, F. J., 1999; Spectral radiative properties identification of glass samples, 15<sup>th</sup> European Conference on Thermophysical Properties, Würzburg, Germany. To be published in "High Temperature- High Pressure". 10p.  
Siegel, R. and Howell, J, R, 1992, Thermal radiation heat transfer, Hemisphere Publishing Corp., Washington.

## **OBTENTION OF THE SPECTRAL RADIATIVE PROPERTIES OF PLANE GLASS SAMPLES**

***Abstract.** Spectral radiative properties of commercial clear glass are identified, like the index of refraction and the absorption coefficient. Such identification takes place in the visible and near infrared region of the electromagnetic spectrum. The method is performed with transmittances and reflectances measurements. Samples with different thickness are tested. The complete set-up as well as some experimental results are presented and discussed in the paper.*

***Keywords:** radiative property, thermal property, absorption coefficient, index of refraction, glass.*