

ESTUDO DA TRANSMITÂNCIA DO POLICARBONATO ALVEOLAR EM DIFERENTES ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA PARA COBERTURA DE UM COLETOR SOLAR PASSIVO

Juan Diego Naranjo Toro– diegonaranjotoro@gmail.com

Cristiano Saboia Ruschel– cristianosaboia@gmail.com

Arno Krenzinger– arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica.

Resumo. Este trabalho apresenta um estudo sobre o policarbonato alveolar para fim de utilização como material para cobertura de um coletor solar passivo localizado no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Rio Grande do Sul (LABSOL). Foram feitas medições da transmitância do policarbonato alveolar de duas espessuras e com diferentes ângulos de incidência. Os resultados indicam uma maior transmitância do policarbonato em comparação com a cobertura dupla de vidro, atualmente utilizada. Além disso, se apresenta uma análise do efeito da orientação (vertical ou horizontal) das aletas internas de reforço do policarbonato alveolar na transmitância para diferentes ângulos de incidência.

Palavras-chave: Policarbonato alveolar, Transmitância, cobertura de vidro duplo, coletor solar passivo.

1. INTRODUÇÃO

A energia solar nas últimas décadas vem ganhando grande importância como uma alternativa viável frente à crescente demanda energética mundial somada à diminuição das reservas de fontes energéticas não renováveis. Diversos materiais foram testados para a elaboração de sistemas que aperfeiçoem o aproveitamento da energia solar.

O Laboratório da Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) trabalha no desenvolvimento de equipamentos para a conversão da energia solar em energia útil, tanto conversão em energia térmica como conversão em energia elétrica. Seguindo essa motivação, o prédio do laboratório foi construído com um coletor solar passivo de 26 m² e 50° de inclinação em sua face norte, como apresenta a Fig. 1. O coletor é constituído por concreto de baixo índice de difusividade térmica, tijolo furado para melhor absorvidade e duas coberturas de vidro para deixar passar os raios solares, os quais aquecem o tijolo que por sua vez esquento o ar por meio da convecção natural. O ar aquecido escoo ao interior do prédio por efeito de termossifão.



Figura 1 - Foto do laboratório de Energia Solar UFRGS com o coletor solar na fachada norte

A seleção de uma cobertura adequada para o coletor solar é muito importante já que ela deve permitir a passagem da maior parte da radiação incidente e evitar ao máximo as perdas térmicas por convecção e por radiação para o meio. A cobertura atual do coletor solar do laboratório é de vidro comum, que é a cobertura mais usada em coletores solares, e se comporta de diferente maneira de acordo aos comprimentos de onda; segundo Duffie e Beckman (2006), o vidro é transparente a radiação incidente em comprimentos de onda de 0,3 μm a 2,8 μm e opaco para comprimentos de onda próximos e maiores a 5 μm , infravermelho. Para evitar a perda de calor, foram utilizados dois vidros com espessura 8 mm com um espaço de ar de 50 mm entre eles.

Outro material que vem sendo usado no setor da energia solar, na parte térmica, é o policarbonato. Sua utilização é frequente em setores como arquitetura e construção, pois possui boas qualidades físicas como sua capacidade de isolamento, resistência ao clima, resistência ao impacto, resistência aos raios ultravioleta, alto nível de resistência ao fogo, baixo peso e facilidade de instalação.

Particularmente o policarbonato alveolar é um tipo de policarbonato constituído por placas finas unidas por aletas as quais dão rigidez ao conjunto, como apresenta a Fig. 2. Entre as duas placas e as aletas há espaços de ar que aumentam o isolamento térmico; além disso, a forma construtiva faz que a luz incidente no material tenha múltiplas reflexões em suas paredes internas, fazendo interessante o estudo da transmissividade do material para diferentes ângulos de incidência da radiação.



Figura 2 - Policarbonato alveolar claro de 6 mm de espessura

O objetivo desse trabalho é realizar um estudo inicial do policarbonato alveolar claro como possível material para as coberturas do coletor solar do Laboratório LABSOL da UFRGS. As medições experimentais da transmitância foram feitas para placas de 6 e 10 mm de espessura a diferentes ângulos de incidência da radiação solar. Os resultados obtidos foram comparados com dados obtidos por Figueira *et al* (2003) da transmitância da cobertura de vidro duplo atualmente instalada no muro.

2. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

2.1 Transmitância e ângulo de incidência

De acordo com Incropera e De Witt (2011), a transmitância de materiais semitransparentes é definida como a fração de energia incidente que transpõe o material, e a transmissividade hemisférica total (τ) é definida como a fração da irradiação total transmitida através de um material semitransparente, como apresenta a Eq. (1).

$$\tau = \frac{G_{transmitida}}{G} \quad (1)$$

A transmitância (τ) esta relacionada com a absortividade (α) e a refletividade (ρ), para um determinado comprimento de onda (λ) como indica a Eq. (2)

$$1 = \tau_\lambda + \rho_\lambda + \alpha_\lambda \quad (2)$$

Em conformidade com Duffie e Beckman (2006), a transmitância (τ), a absortividade (α) e a refletividade (ρ) são função da radiação incidente, espessura da cobertura, índice de refração (n) e o coeficiente de extinção (k), onde o índice de refração (n) e o coeficiente de extinção (k) da cobertura são função do comprimento de onda. Porém, para o vidro é uma boa aproximação assumi-los como constantes independentes do comprimento de onda. O (k) depende do tipo de cobertura, para o vidro varia de 4 m^{-1} até 32 m^{-1} . O (n) também depende do tipo de material, sendo 1 para o ar e 1,526 para o vidro.

O ângulo de incidência (θ_i) é o ângulo entre a radiação direta que atinge a cobertura e uma linha perpendicular à cobertura. De acordo com Duffie e Beckman (2006) a Eq. (3) apresenta a equação do ângulo de incidência.

$$\theta_i = \cos^{-1}(\sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega) \quad (3)$$

Onde (δ) é o ângulo de declinação solar mostrado na Eq. (4), o qual depende do dia do ano; (ϕ) é a latitude, para as medições realizadas é de 30° sul que corresponde à cidade de Porto Alegre; (β) é o ângulo de inclinação da cobertura com respeito ao horizontal; (γ) é o ângulo de azimute da superfície em relação ao sul, o qual é positivo para o oeste e negativo para o leste; (ω) é o movimento angular do sol respeito à longitude, onde uma hora corresponde a 15°, sendo de manhã negativo e a tarde positivo; (ω) deve ser calculado com o tempo solar verdadeiro (TSV), como é apresentado na Eq. (5).

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (4)$$

Onde n é o numero do dia do ano, sendo 1 o dia primeiro de janeiro e 365 o dia trinta e um de dezembro.

$$TSV = T_o + 4(L_{st} + L_{loc}) + E_t \quad (5)$$

Onde L_{st} é a longitude de referência e L_{loc} a longitude do local, que para esse caso são respectivamente 45° (equivalente ao fuso horário de Brasília) e 51,2° a longitude de Porto Alegre; E_t corresponde a equação do tempo de acordo com a Eq. (6).

$$E_t = 229,2 \left(0,000075 + 0,001868 \cos\left((n-1)\frac{360}{365}\right) - 0,032077 \sin\left((n-1)\frac{360}{365}\right) - 0,014615 \cos\left(2(n-1)\frac{360}{365}\right) - 0,04089 \sin\left(2(n-1)\frac{360}{365}\right) \right) \quad (6)$$

A Eq. (7) dada por Snell relaciona os ângulos de incidência (θ_i) e de transmitância (θ_t) para uma cobertura semitransparente por médio dos índices de refração (n) de cada médio.

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (7)$$

As Eq. (8) e (9) representam respectivamente a componente perpendicular da radiação não polarizada (r_{\perp}) e a componente paralelo da radiação não polarizada (r_{\parallel}).

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (8)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (9)$$

A Eq. (10) apresenta a transmitância para (N) numero de coberturas onde só são consideradas as perdas devidas a refletância (ρ).

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - r_{\parallel}}{1 + (2N - 1)r_{\parallel}} + \frac{1 - r_{\perp}}{1 + (2N - 1)r_{\perp}} \right) \quad (10)$$

Por sua vez, a Eq. (11) mostra a transmitância para uma espessura total (L) das coberturas, onde só as perdas devidas à absorvidade (α) são consideradas.

$$\tau_a = \exp\left(-\frac{KL}{\cos \theta_t}\right) \quad (11)$$

A transmitância total (τ) de uma cobertura de um coletor solar deve levar em conta as perdas devidas a absorvidade (α) e a refletividade (ρ) como apresenta a Eq. (12).

$$\tau = \tau_a \tau_r \quad (12)$$

2.2 Superfícies seletivas

As superfícies seletivas são aquelas que apresentam comportamento distinto para diferentes bandas espectrais, podendo ser opacas ou semitransparentes de acordo com o comprimento de onda incidente. Segundo Duffie e Beckman (2006), a maior parte de energia do espectro solar extraterrestre se encontra entre um comprimento de onda de 0,2 μm a 2,8 μm , sendo desejados materiais que permitam a passagem da radiação incidente nesse comprimento de onda. Para

contribuir com o efeito estufa a cobertura deve ser opaca a radiação emitida pelo absorvedor, neste caso o muro coletor, o qual atinge temperaturas da ordem de 350 K. O espectro emitido por um corpo negro nessa faixa de temperatura encontra-se situado entre 2,5 μm a 50 μm . O vidro e o policarbonato são materiais que possuem esse comportamento seletivo, tal como apresenta a Fig. 3 obtida de Keppeler (1978), onde se apresenta o comportamento espectral da transmitância normal do vidro e policarbonato de 2 mm de espessura.

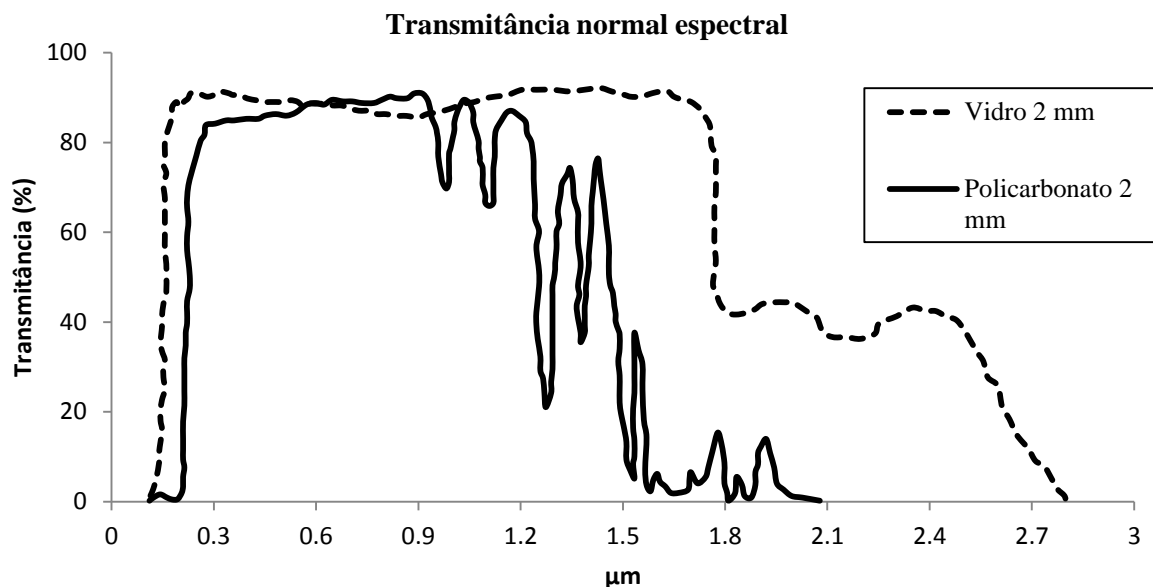


Figura 3 - Transmitância normal espectral para vidro e policarbonato de 2 mm de espessura

2.2 Modelagem experimental

A Fig. 4 apresenta o experimento montado para a medida da transmitância das placas de policarbonato alveolar. O instrumento utilizado para medir a radiação global foi um piranômetro marca Eppley modelo PSP, com fator de calibração de $10,42 \mu\text{V}/\text{W}\cdot\text{m}^2$ e tempo de resposta de 1 segundo. Também foi usada uma célula fotovoltaica marca Ingenieurbüro Mencke & Tegmeyer GmbH modelo Si-10TC-K como instrumento de apoio para verificar se não aconteceram mudanças na intensidade da radiação global no momento em que estavam sendo realizadas as medidas.

A caixa de suporte foi construída de forma que permitisse a variação do ângulo da placa de policarbonato junto com o instrumento de medida. As paredes da caixa evitam que o instrumento de medida tome dados da radiação difusa ou de albedo correspondentes ao ambiente. Além disso, as superfícies interiores da caixa foram pintadas de preto fosco para evitar as reflexões em seu interior.



Figura 4 - Suporte do instrumento de medida e das placas de policarbonato

A metodologia adotada foi medir a radiação global incidente na caixa com o piranômetro, com e sem a placa de policarbonato, mudando os ângulos de inclinação (β) e de azimute da superfície (γ) como apresenta a Fig. 5. A partir dessas medições, utilizando a Eq. (1), se obtém a transmissividade do material para cada ângulo medido.

Na Fig. 5 também é apresentado o ângulo de azimute solar (γ_s), o qual é o ângulo de deslocamento a partir do sul da projeção da radiação direta sobre o plano horizontal, o ângulo de zênite solar (θ_z) que é o ângulo entre os raios do sol e a vertical a terra e o ângulo de altitude solar (φ), que é o complementar do ângulo de zênite (θ_z).

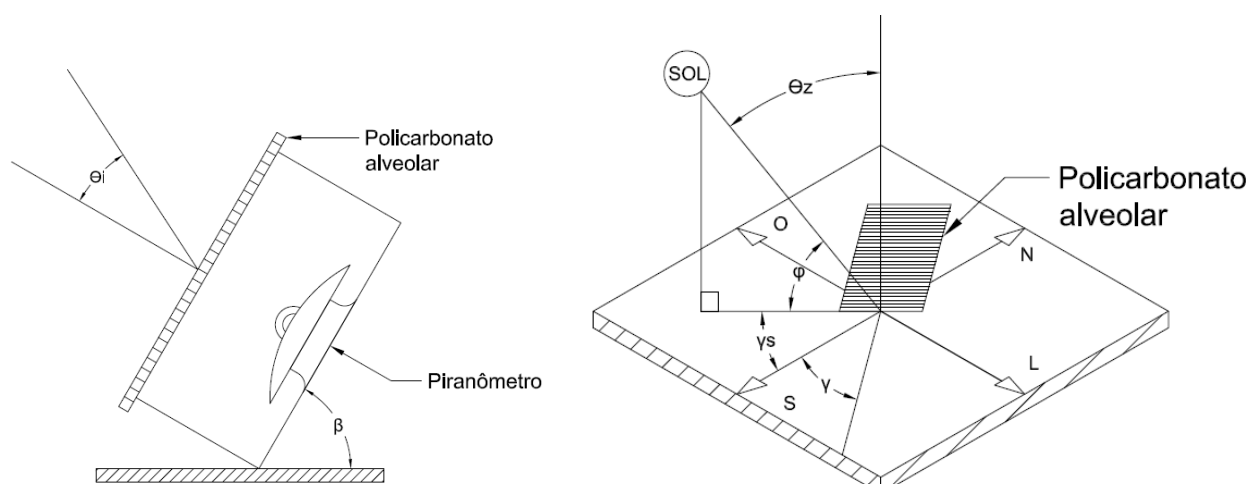


Figura 5 - Metodologia da variação do ângulo de incidência.

A variação dos ângulos de inclinação (β) e de superfície (γ) foi feita de forma a não fazer sombra na superfície do piranômetro. As medições foram feitas em um dia limpo (sem nuvens) que apresenta uma menor variação da radiação solar. Mesmo assim, para cada medida feita com o polycarbonato, a medição da radiação global incidente foi repetida, a fim de minimizar os erros causados por possíveis variações da radiação solar ao longo do tempo.

Devido às aletas interiores que possui o polycarbonato alveolar, foi necessário estudar o efeito que elas produzem na transmitância em diferentes ângulos de incidência quando as placas são posicionadas na direção horizontal ou vertical, conforme mostrado na Fig. 6. Para o vidro, isto não tem implicação nenhuma já que ele apresenta comportamento isotrópico com relação à transmissividade.

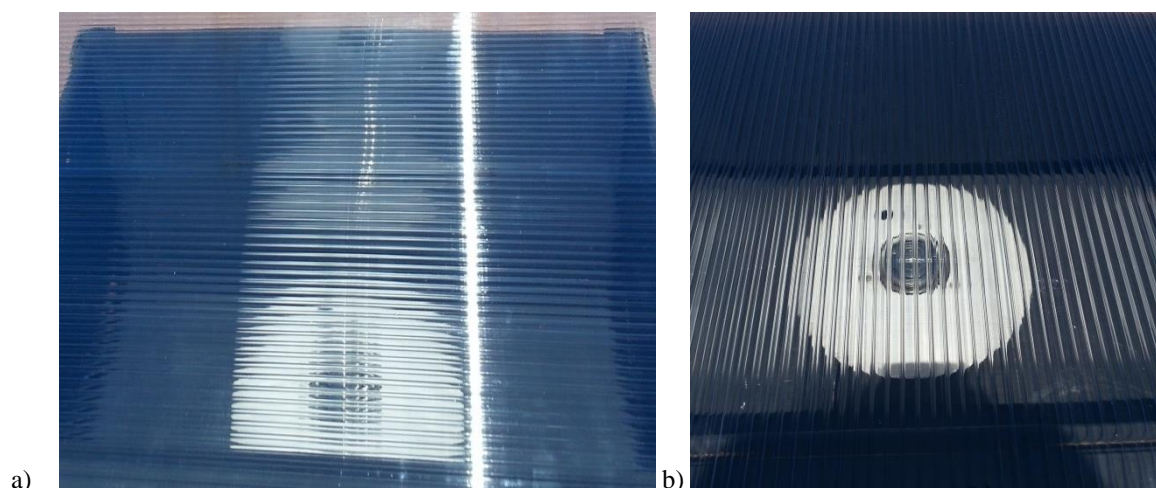


Figura 6 - Placas de polycarbonato alveolar em posição a) Horizontal b) Vertical

Para fazer estas análises o ângulo de azimute da caixa (γ) foi alterado com o passar do tempo, de forma a acompanhar o ângulo de azimute solar (γ_s), de forma que o ângulo de incidência (θ_i) é devido apenas à diferença entre a inclinação da superfície (β) e a altitude solar (ϕ), que é o complementar do ângulo de zênite solar (θ_z).

3. RESULTADOS

O estudo da transmitância da dupla cobertura do vidro do muro coletor foi realizado por Figueira *et al* (2003). Os resultados por eles obtidos são apresentados na Fig. 7. Devido à inclinação do muro e aos dias que foram feitas as medições (26, 27 e 28 de fevereiro de 2003) o ângulo mínimo de incidência medido foi de 28° ; portanto, a transmitância foi calculada analiticamente a partir da Eq. (12), utilizando as mesmas características do vidro duplo do coletor, que apresenta um coeficiente de extinção de $27,4 \text{ m}^{-1}$ e índice de refração de 1,53 e esses resultados são apresentados na Fig. 7.

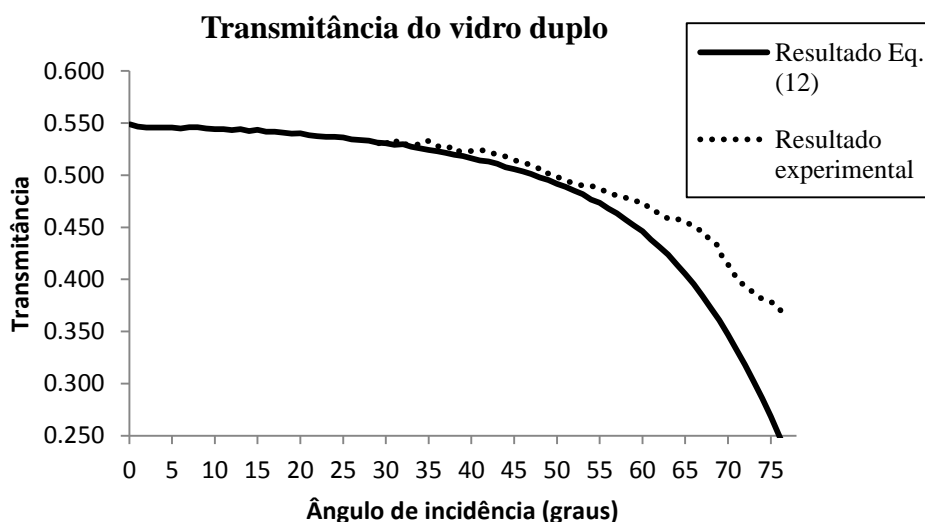


Figura 7 - Transmitância do vidro duplo para diferentes ângulos de incidência

Onde o resultado analítico obtido com a Eq. (12) comporta-se de maneira similar ao experimental para ângulos menores que 55° . A diferença encontrada em ângulos maiores que 55° é possivelmente devido à radiação difusa e de albedo incidentes, não consideradas na Eq. (12).

As Tab. 1 e 2 comparam os resultados para a transmitância em diferentes ângulos de incidência das placas de policarbonato alveolar com os resultados obtidos para a cobertura dupla do vidro. A Tab. 1 mostra as placas de policarbonato alveolar em posição horizontal e a Tab. 2 em posição vertical.

Tabela 1 - Comparação da transmitância das placas de policarbonato alveolar de 6 e 10 mm de espessura em posição horizontal e cobertura de vidro duplo para diferentes ângulos de incidência

| Ângulo de incidência (Graus) | Transmitância Policarbonato Alveolar 10 mm | Transmitância Policarbonato Alveolar 6 mm | Transmitância vidro duplo Eq. (12) | Transmitância vidro duplo Figueira <i>et al</i> (2003) |
|------------------------------|--|---|------------------------------------|--|
| 9 | 0,78 | 0,78 | 0,55 | - |
| 12 | 0,77 | 0,78 | 0,54 | - |
| 20 | 0,74 | 0,72 | 0,54 | 0,53 |
| 39 | 0,67 | 0,78 | 0,52 | 0,52 |
| 52 | 0,65 | 0,75 | 0,49 | 0,49 |
| 66 | 0,41 | 0,51 | 0,40 | 0,45 |

Tabela 2 - Comparação da transmitância das placas de policarbonato alveolar de 6 e 10 mm de espessura em posição vertical e cobertura de vidro duplo para diferentes ângulos de incidência

| Ângulo de incidência (Graus) | Transmitância Policarbonato Alveolar 10 mm | Transmitância Policarbonato Alveolar 6 mm | Transmitância vidro dupla Eq. (12) | Transmitância vidro duplo Figueira <i>et al</i> (2003) |
|------------------------------|--|---|------------------------------------|--|
| 9 | 0,79 | 0,77 | 0,55 | - |
| 13 | 0,71 | 0,69 | 0,54 | - |
| 20 | 0,78 | 0,73 | 0,54 | - |
| 37 | 0,64 | 0,62 | 0,52 | 0,53 |
| 39 | 0,69 | 0,65 | 0,52 | 0,52 |
| 52 | 0,69 | 0,65 | 0,49 | 0,49 |
| 66 | 0,49 | 0,43 | 0,40 | 0,45 |

Das Tab. 2 e 3 pode-se observar que a transmitância dos policarbonatos alveolares de 6 e 10 mm são superiores à da cobertura do vidro duplo atualmente instalada no muro coletor. Para o vidro duplo, a maior transmitância obtida é da ordem de 55% para um ângulo de incidência de 6° , enquanto que para o policarbonato se obteve resultados de transmitância superiores a 70%, com ambas formas de orientação das aletas. Além disso, é importante notar que ambas placas de policarbonato alveolar apresentaram maior transmissividade que o vidro duplo para praticamente todos os ângulos de incidência, com exceção de algumas medidas com o maior ângulo testado, que indicaram valores muito próximos para o vidro duplo e uma das placas.

Para uma melhor análise da influência da orientação das aletas, a Tab. 3, compara a transmitância do policarbonato para as duas direções das mesmas para um ângulo de incidência 39° .

Tabela 3 - Transmitância do policarbonato alveolar de 6 e 10 mm de espessura para um ângulo de incidência de 39° e orientação das aletas horizontal e vertical

| | | | | |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Ângulo de incidência | 39° | 39° | 39° | 39° |
| Espessura policarbonato alveolar | 10 mm | 10 mm | 6 mm | 6 mm |
| Direção | Horizontal | Vertical | Horizontal | Vertical |
| Transmitância | 67% | 69% | 78% | 65% |

Da Tab. 3 pode-se observar que a transmitância do policarbonato realmente depende da orientação das aletas. Para uma orientação horizontal das aletas, o policarbonato de 6 mm de espessura tem melhor transmitância do que o policarbonato de 10 mm; porém para uma orientação vertical a melhor transmitância foi para o policarbonato de 10 mm de espessura.

Nas Tab. 1 e 2 pode ser observado que o comportamento da transmitância do policarbonato alveolar apresenta flutuações nas medidas e não tem um comportamento constante como o vidro, mas tem tendência a diminuir com o aumento do ângulo de incidência (θ_i). Esse comportamento pode ocorrer devido às múltiplas reflexões no interior da placa de policarbonato alveolar ou por um possível sombreamento sobre o equipamento de medida causado pelas aletas interiores da placa. A Fig. 8 mostra um esquema das possíveis reflexões no interior de uma seção do policarbonato alveolar.

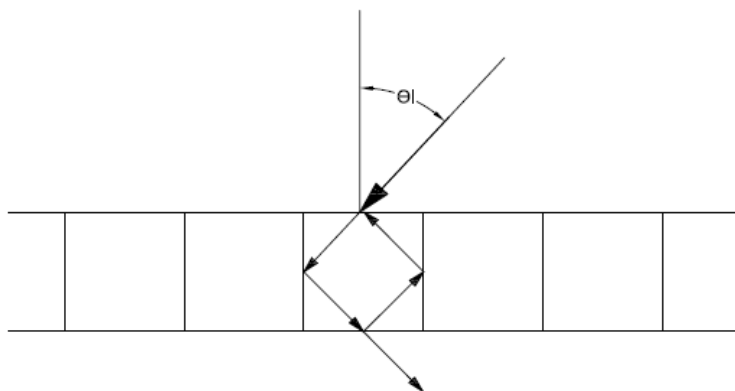


Figura 8 - Possíveis refletâncias ao interior de uma seção do policarbonato

4. CONCLUSÕES

Foram feitas medições da transmitância do policarbonato alveolar claro de 6 e 10 mm de espessura para diferentes ângulos de incidência para cada uma das direções das aletas, horizontal e vertical. Os resultados obtidos indicam que o policarbonato alveolar claro tem melhor transmitância que a cobertura do vidro dupla atualmente instalada no muro coletor, obtendo valores até 55% melhores do que a cobertura do vidro.

Foi corroborada a dependência da transmitância do policarbonato alveolar com respeito à orientação das aletas de reforço internas, tendo o policarbonato de espessura de 6 mm apresentado melhores resultados na orientação horizontal das aletas, enquanto o policarbonato de 10 mm de espessura obteve melhor desempenho na orientação vertical das aletas.

Este trabalho foi a primeira etapa do estudo de custo-benefício do material cobertor do muro coletor do laboratório de energia solar da UFRGS, pois além da transmitância, é necessário estudar o grau de isolamento térmico apresentado pela placa do policarbonato alveolar e seu comportamento com relação à radiação infravermelha de onda longa, a fim

de confirmar seu comportamento seletivo, que contribui como efeito estufa. Com esses resultados, será possível fazer um estudo numérico para simular o comportamento térmico do muro coletor e o escoamento do ar ao interior com a cobertura de policarbonato alveolar.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio por parte do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 2006. Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons.
- Figueira, D. S., Krenzinger, A., Vielmo, A. H., 2003. Daily Performance Evaluation of a Trombe-Michael Wall, São Paulo – SP, 17th International congress of mechanical engineering, November 10-14, 2003.
- Incropera, F. P., Dewitt D. P., 2011. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons.
- Keppeler, R. O., 1978. Caracterização de Materiais para Cobertura em Coletores Solares, Dissertação de Mestrado. PPGEMM – UFRGS, Porto Alegre. APUD Krenzinger, A., Superfícies Seletivas para Conversão Térmica da Energia Solar – Óxidos de Cobre sobre Cobre, Dissertação de mestrado. PPGEMM – UFRGS, Porto Alegre.

STUDY OF MULTIWALL POLYCARBONATE CLEAR TRANSMITTANCE FOR DIFFERENT ANGLES OF INCIDENCE FOR A PASSIVE SOLAR COLLECTOR COVER

Abstract. *This work shows a study about the multiwall polycarbonate as a material for a cover of a passive solar collector located in the solar energy laboratory of the University Federal of Rio Grande do Sul (LABSOL). Measurements of transmittance of the multiwall polycarbonate were made for different thicknesses and different angles of incidence. The results show the high transmittance of the polycarbonate as a material cover over the results previously reported for double glass cover.*

In addition, this paper presents an analysis of the effect of the orientation (horizontal or vertical) of the internal reinforcing vanes of the multiwall polycarbonate in the transmittance with different angles of incidence.

Key words: *Multiwall polycarbonate, Transmittance, Double glass cover, Passive solar collector.*