

ANÁLISE COMPARATIVA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR ENTRE O VIDRO E O AEROGEL

Agnaldo Luís Guolo

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PUCPR – Rua Imaculada Conceição, 1155 – Prado Velho, Curitiba –PR - Brasil
agnaldo.luiz@csn.com.br

Luís Mauro Moura

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PUCPR – Rua Imaculada Conceição, 1155 – Prado Velho, Curitiba –PR - Brasil
Luis.moura@pucpr.br

Resumo. Apresenta-se neste trabalho um estudo comparativo da transferência de calor através de dois meios semitransparentes: o vidro e o aerogel. Os meios considerados apresentam emissão, absorção e espalhamento isotrópico, tendo como condição de contorno um feixe de radiação colimado incidindo perpendicularmente numa das faces. Foram considerados os processos de condução e radiação acoplados para uma geometria unidimensional (meio plano) em regime permanente. O programa desenvolvido permite a análise da influência de cada processo (condução/radiação) na transferência total de calor através dos materiais, assim como a comparação do efeito de isolamento térmico do aerogel em relação ao vidro para determinadas condições de temperatura nas faces.

Palavras chave: Aerogel, transferência de calor por condução e radiação, eficiência energética.

1. Introdução

A transferência de calor por condução e/ou convecção combinada com a radiação através de um meio participante que absorve, emite e espalha a radiação térmica é um fenômeno que aparece em muitas aplicações práticas e de engenharia; alguns exemplos são as janelas de edificações, fornos, automóveis e aeronaves, onde são utilizados materiais semitransparentes como o vidro e mais recentemente o aerogel.

O aerogel combina transparência com alta resistividade térmica, o que o torna um material atrativo para várias aplicações tais como: espaçadores entre placas de vidro em janelas isoladas, sistemas de isolamento transparentes para muros de casas e ainda como material substituto para o vidro. Além disso, partículas são adicionadas à matriz deste material de maneira a refletir uma parcela da radiação solar incidente.

O processo de transferência radiativa em aerogéis, sobretudo os que possuem uma matriz com índice de refração diferente da unidade, é complexo. A radiação incidente na interface é uma parte refletida e a restante refratada para o interior do material. Em seguida, a parcela de energia que atravessa este material sofre espalhamento em função da diferença de índices de refração entre as partículas dispersas e a matriz, e então, finalmente noutra interface uma parcela do feixe é novamente refletida e refratada, e assim por diante (Moura, 2002).

Algumas aplicações importantes envolvendo o vidro são as placas de cobertura dos coletores solares e os vidros das janelas de edificações. Em especial nos edifícios comerciais envidraçados, as vidraças (“glazings”) desempenham um importante papel na performance térmica destes edifícios; além de permitirem um contato visual com o meio ambiente externo e da sua função estética, as vidraças atuais são verdadeiros filtros de calor e/ou radiação solar (Borges, 2004); são sistemas compostos por uma ou várias camadas de vidro combinadas com algum tipo de revestimento: revestimento de um único metal (nobre) e/ou de óxido metálico, tingimento ou revestimento de multicamadas (películas de controle solar) (Pfrommer *et al.*, 1995).

Em todas as aplicações descritas acima, é de fundamental importância o cálculo da transferência de calor através do vidro para se determinar a carga térmica envolvida no projeto ou sistema já existente.

Apesar das janelas e revestimentos serem normalmente finos, o conhecimento do perfil de temperatura no seu interior é importante em algumas aplicações tais como nos processos de tratamento térmico dos vidros, processos de laminação de vidros de segurança multicamadas, em componentes solares para altas temperaturas, na determinação da distribuição de temperatura em tanques de derretimento de vidro, aquecimento das janelas de naves espaciais e aeronaves, em alguns revestimentos isolantes de calor e no estudo do aquecimento de janelas e lentes através de raio laser (Siegel e Howell, 2002).

O modelo de simulação é baseado no Método das Ordenadas Discretas na condição de simetria do campo radiativo. Simulações numéricas permitem compreender o processo de transferência de calor por radiação e estudar os parâmetros que influenciam este processo.

Barker e Sutton (1985) investigaram a transferência de calor transiente envolvendo radiação e condução para um meio plano, cinza e participante tendo suas faces aquecidas externamente. A técnica da transformada integral é utilizada para resolver a equação de energia transiente enquanto um método iterativo fornece a solução para a transferência de calor acoplada.

Glass *et al.* (1987) analisaram o acoplamento da condução e da radiação num meio semitransparente cinzento, emissor e absorvedor tendo o fluxo de calor nas faces externas como condições de contorno. Ressalta-se a análise da influência do parâmetro de relação entre condução e radiação (N), da espessura ótica e das emissividades das faces (com revestimentos opacos) e do meio no aumento da temperatura das faces.

Siegel e Spuckler (1993) estudaram um meio semitransparente com várias subcamadas cada uma com seu índice de refração e espessura ótica próprios. As temperaturas e o fluxo de calor resultantes são dados para se mostrar o efeito das variações do índice de refração e espessura ótica através das subcamadas.

Heinemann *et al.* (1996) analisaram a transferência de calor por condução e radiação acoplados em aerogéis de sílica com baixa densidade. Foi feito um estudo teórico e experimental para várias espessuras óticas e relações de transferência de calor condução/radiação; sendo materiais com alta porosidade, foi variada a pressão no interior dos mesmos, considerando-se a variação das propriedades físicas resultantes.

Nicolau e Maluf (2001) determinaram algumas propriedades de vidros comerciais como o índice de refração e o coeficiente de absorção. Diferentes espessuras são ensaiadas. Apresentaram também o conjunto experimental completo, além dos modelos numéricos.

Diferentemente dos trabalhos já publicados, neste trabalho apresenta-se um modelo para a transferência de calor por radiação e condução acoplados, através de um meio semitransparente que apresenta espalhamento constituído de uma matriz sólida com índice de refração não unitário (aerogel) e também através de um meio semitransparente não difusor (vidro), fazendo-se um estudo comparativo amplo entre estes materiais. Como objetivo final busca-se avaliar as vantagens da aplicação do Aerogel como substituto do vidro comercial.

2. Equação da Transferência Radiativa (ETR)

O estudo da transferência de calor por radiação em meios participantes é realizado através da solução da Equação de Transferência Radiativa (ETR). Nesta análise considera-se um meio homogêneo, emissor, absorvedor, com espalhamento e em equilíbrio termodinâmico. As fronteiras possuem componentes de reflexão especular e de espalhamento, além de efetuarem refração a um feixe incidente não normal a superfície. Neste estudo a ETR é considerada para uma geometria com simetria azimutal.

Através da Equação da Transferência Radiativa (ETR) podem-se calcular as trocas de energia entre interfaces (paredes, fronteiras) considerando um meio participante (Meio Semitransparente – MST). A ETR descreve a variação da intensidade radiativa, I . Esta equação foi obtida para um meio pseudocontínuo em relação à transferência radiativa existente num material disperso real.

Para a obtenção da ETR efetua-se um balanço dos mecanismos físicos de interação radiação/meio por um feixe de radiação se propagando através de um meio que absorve, emite, ou espalha, obtém-se a expressão da ETR monocromática:

$$\frac{1}{(\sigma_a + \sigma_d)} \bar{\Omega} \cdot \nabla I(\bar{s}, \bar{\Omega}) + I(\bar{s}, \bar{\Omega}) = \left(1 - \frac{\sigma_d}{(\sigma_a + \sigma_d)} \right) I_b(T) + \frac{1}{4\pi} \frac{\sigma_d}{(\sigma_a + \sigma_d)} \int_{\Omega=4\pi} p(\bar{\Omega}', \bar{\Omega}) I(\bar{s}, \bar{\Omega}') d\Omega' \quad (1)$$

onde I é a intensidade radiativa, I_b aquela do corpo negro, \bar{s} é a variável de posição função do sistema de coordenadas utilizado, $\bar{\Omega}$ é a variável direcional, σ_a é o coeficiente de absorção, σ_d é o coeficiente de espalhamento $p(\bar{\Omega}', \bar{\Omega})$ é a função de fase. A intensidade total da radiação de um corpo negro é dada por:

$$I_b = \frac{n^2 \sigma T^4}{\pi} \quad (2)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann, n é o índice de refração do meio equivalente a um meio homogêneo e T é a temperatura. A ETR pode ser escrita na sua forma adimensional. Neste caso os termos da Eq. (1) serão substituídos por:

$$\tau = \beta s \cos \theta \quad \omega = \frac{\sigma_d}{\sigma_d + \sigma_a} = \frac{\sigma_d}{\beta} \quad (3)$$

onde β é o coeficiente de extinção, τ é a coordenada ótica θ é o ângulo polar e ω é o albedo.

A radiação percorre uma distância no interior do meio e este percurso deve ser projetado sobre um sistema de coordenadas. O sistema de coordenadas cartesianas e seus co-senos diretores respectivos (μ, η, ξ) são mostrados na Fig.

1. As equações dos ângulos da direção $\bar{\Omega}$ em relação aos eixos são relacionadas através das seguintes equações:

$$d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi \quad (4)$$

$$\begin{cases} \mu = \cos\theta \\ \eta = \cos\alpha_y = \sin\theta \cos\phi \\ \xi = \cos\alpha_z = \sin\theta \sin\phi \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \vec{\Omega}' \cdot \vec{\Omega} = \cos\theta_p = \mu\mu' + \sqrt{1-\mu^2}\sqrt{1-\mu'^2}\cos(\phi-\phi') \\ \cos\theta_p = \mu\mu' + \eta\eta' + \xi\xi' \end{aligned} \quad (6)$$

As Eqs. (5) e (6) definem o ângulo θ_p formado entre duas direções $(\vec{\Omega}', \vec{\Omega})$ a partir dos co-senos diretores. O ângulo correspondente a μ é o ângulo polar e o ângulo ϕ é o ângulo de azimute.

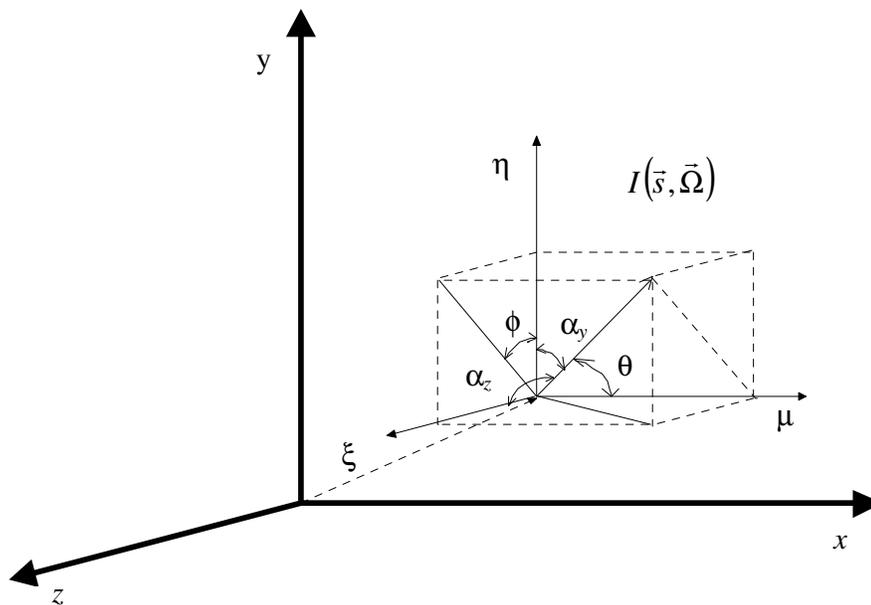


Figura 1. Definição dos co-senos diretores (μ, η, ξ) (Moura, 2002).

Para uma geometria unidimensional cartesiana, Fig. 2, a ETR se simplifica:

$$\frac{1}{\beta} \frac{dI(\vec{s}, \vec{\Omega})}{ds} + I(\vec{s}, \vec{\Omega}) = (1 - \omega) I_b(T) + \frac{\omega}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} p(\vec{\Omega}', \vec{\Omega}) I(\vec{s}, \vec{\Omega}') d\Omega' \quad (7)$$

Utilizando-se a condição de simetria azimutal onde as variáveis tornam-se independentes do ângulo de azimute (ϕ) e são constantes em torno de um cone de ângulo sólido (Ω) centrado no eixo x .

A ETR, Eq. (7), torna-se:

$$\mu \frac{\partial I(\tau, \mu)}{\partial \tau} + I(\tau, \mu) = (1 - \omega) I_b(T) + \frac{\omega}{2} \int_{-1}^1 I(\tau, \mu') p(\mu', \mu) d\mu' \quad (8)$$

onde, τ é a coordenada ótica, $I_b(T)$ é a intensidade de radiação emitida pelo corpo negro à temperatura do meio, ω é o albedo, μ é o cosseno do ângulo polar e p é a função de fase. O termo integral representa o ganho por difusão para cada semi-hemisfério.

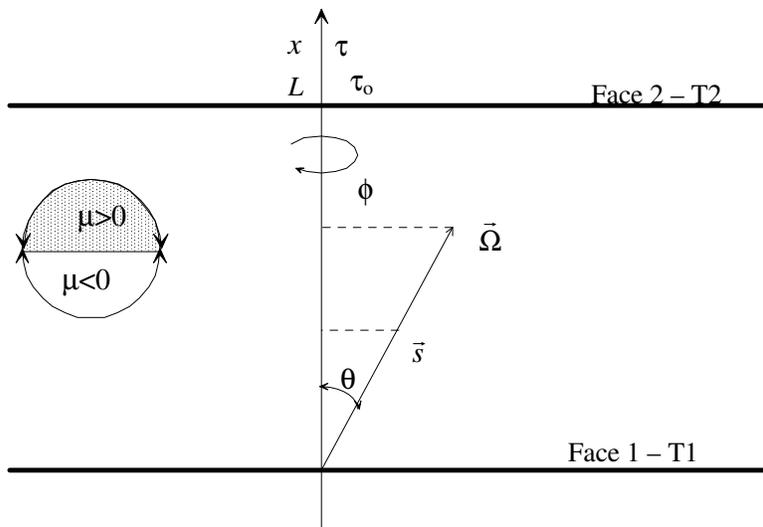


Figura 2. Sistema de coordenadas unidimensional (meio plano semitransparente) (Moura, 2002).

2.1. Solução da equação da transferência radiativa: método das ordenadas discretas

Neste trabalho, a ETR será resolvida numericamente pelo Método das Ordenadas Discretas (MOD) aplicado a um volume de controle. Esta técnica de solução da ETR é descrita detalhadamente em Moura *et al.* (1997 e 1998).

A Eq. (8) é do tipo integro-diferencial. Sua solução pelo Método das Ordenadas Discretas é constituída de duas etapas: *i*) uma discretização angular, sendo o termo integral substituído por uma soma das intensidades radiativas. Desta maneira, obtém-se um conjunto de equações diferenciais ordinárias de primeira ordem; *ii*) uma discretização espacial, considerando um volume de controle, para a solução das equações diferenciais ordinárias.

Considerando-se como condição de contorno faces opacas, espalhadoras em emissão e reflexão, tem-se as intensidades radiativas dadas por:

$$\begin{cases} \tau=0 \rightarrow I(0, \mu) = \varepsilon_1 I_b(T_1) + 2(1 - \varepsilon_1) \int_0^1 I(0, -\mu') \mu' d\mu' & \mu > 0 \\ \tau=\tau_0 \rightarrow I(\tau_0, \mu) = \varepsilon_2 I_b(T_2) + 2(1 - \varepsilon_2) \int_0^1 I(\tau_0, \mu') \mu' d\mu' & \mu < 0 \end{cases} \quad (9)$$

onde:

- ε_1 : emissividade da parede 1
- ε_2 : emissividade da parede 2
- T_1 e T_2 : temperaturas das faces 1 e 2 respectivamente
- μ_0 : co-seno do ângulo de divergência do feixe colimado
- τ_0 : espessura ótica da face 2

Considerando-se uma função de interpolação linear para o cálculo da variação da intensidade radiativa no interior do volume, obtém-se então, a partir da Eq. (8), uma equação discretizada na seguinte forma:

$$I_{i+1/2, j} = \frac{S_{i+1/2, j} \alpha_j / 2 + I_{i, j}}{1 + \alpha_j / 2} \quad (10)$$

sendo

$$\alpha_j = \frac{\Delta \tau_{i+1/2}}{\mu_j} \quad (11)$$

$$S_{i+1/2, j} = (1 - \omega) I_b(T_{i+1/2}) + \frac{\omega}{2\beta} \left[\sum_{n=1}^{N_d/2} w_n (P_{nj} I_{i+1/2, n} + P_{-nj} I_{i+1/2, -n}) \right] \quad (12)$$

onde o índice $i+1/2$ representa o centro do volume situado entre as faces de índice i e $i+1$. Na equação 11 $I_{i,j}$ é um valor conhecido e calcula-se $I_{i+1/2,j}$ através de várias iterações, atualizando o termo fonte $S_{i+1/2,j}$. As ponderações são representadas por w_n e são associadas as direções μ_n ; $\Delta\tau$ representa a variação da variável ótica, p representa a função de fase e N_d representa o número de direções da quadratura.

As condições de contorno são obtidas a partir da Eq. (9):

$$\begin{cases} I(0, \mu_j) = \varepsilon_1 I_b(T_1) - 2(1-\varepsilon_1) \sum_{\mu_n < 0} w_n \mu_n I(0, \mu_n) & \mu_j > 0 \\ I(\tau_o, \mu_j) = \varepsilon_2 I_b(T_2) + 2(1-\varepsilon_2) \sum_{\mu_n > 0} w_n \mu_n I(\tau_o, \mu_n) & \mu_j < 0 \end{cases} \quad (13)$$

O fluxo de calor (q_R), a radiação incidente (G) e o divergente do fluxo radiativo (\dot{q}) são definidos como:

$$\bar{q}_r(\tau) = \int_{\Omega=4\pi} I(\tau, \bar{\Omega}) \bar{\Omega} d\Omega \quad q_{Ri} = 2\pi \sum_{n=1}^{N_d/2} w_n \mu_n (I_{i,n} - I_{i,-n}) \quad (14)$$

$$G(\tau) = 2\pi \int_{-1}^1 L(\tau, \mu) d\mu \quad G_i = 2\pi \sum_{n=1}^{N_d/2} w_n (I_{i,n} + I_{i,-n}) \quad (15)$$

$$\dot{q} = \text{div}(\bar{q}^r(s)) = \sigma_a \left[4\pi L^0 - \int_{\Omega=4\pi} L(\tau, \bar{\Omega}) d\Omega \right] \quad \dot{q}_i = \text{div}\left(\vec{q}_R\right) = \sigma_a \left[4n^2 I_b - 2\pi \sum_{n=1}^{N_d/2} w_n (I_{i,n} + I_{i,-n}) \right] \quad (16)$$

2.2. Condução e radiação combinados

A equação da energia para os processos de radiação e condução simultâneos em um meio participante pode ser escrita da seguinte forma:

$$m c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + Q''' - \vec{\nabla} \cdot \bar{q}_R \quad (17)$$

onde m é a massa específica, c_p é o calor específico, k é a condutividade térmica, Q''' é a geração interna de calor e q_R é o fluxo radiativo

Para o caso de um meio unidimensional, plano e com regime permanente e sem geração interna de calor, a Eq. (17) fica reduzida a:

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} - q_R \right) = 0 \quad (18)$$

As condições de contorno correspondem às temperaturas nas duas faces:

$$x = 0: T(0) = T_1 \quad (19)$$

$$x = L: T(L) = T_2 \quad (20)$$

O divergente do fluxo radiativo será obtido pelo Método das Ordenadas Discretas:

$$\frac{dq_R}{dx} = \int_0^\infty \sigma_{av} (4\pi I_{bv} - G_v) dv \quad (21)$$

onde

$$G_v = \int_{4\pi} I_v d\Omega \quad (22)$$

Introduzindo-se as variáveis e parâmetros adimensionais (Modest, 1993):

$$\xi = \frac{x}{L}, \quad \theta_T = \frac{T}{T_1}, \quad \Psi_R = \frac{q_R}{n^2 \sigma T_1^4}, \quad g = \frac{G}{4n^2 \sigma T_1^4}; \quad (23)$$

$$\tau_0 = \beta L, \quad \theta_L = \frac{T_2}{T_1}, \quad N = \frac{k\beta}{4\sigma T_1^3},$$

onde τ_0 é a espessura óptica do meio, N é o parâmetro de relação entre condução e radiação e L é a espessura do meio. Reduz-se as Eqs. (18) a (21) a:

$$\frac{d^2 \theta_T}{d\tau^2} = \frac{1}{4N} \frac{d\Psi_R}{d\tau} \quad (24)$$

$$\frac{d\Psi_R}{d\tau} = 4(\theta_T^4 - g) \quad (25)$$

$$\theta_T(0) = 1; \quad \theta_T(\tau_0) = \theta_L \quad (26)$$

2.3. Discretização da equação da difusão

A equação da difusão será também resolvida numericamente pelo Método dos Volumes Finitos. Considerando-se um problema unidimensional em regime permanente, a equação da difusão pode ser representada pela seguinte expressão:

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) + \dot{q} = 0 \quad (27)$$

Sendo \dot{q} o divergente do fluxo radiativo e k a condutividade térmica do meio (função da temperatura).

A discretização da Eq. (27) é feita dividindo-se o meio em volumes justapostos na direção da espessura (eixo x). Para cada volume de controle (Fig. 3) são considerados os volumes anterior (W) e posterior (E) utilizando-se sempre como referência os pontos centrais.

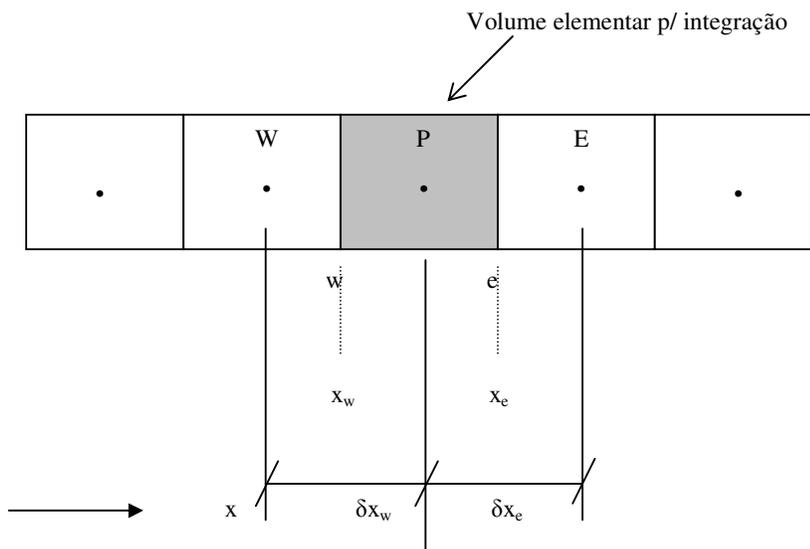


Figura 3. Discretização com volumes finitos.

Sendo $\Delta x = x_e - x_w$ e integrando o volume de controle entre os limites x_w e x_e tem-se:

$$\int_{x_w}^{x_e} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} \right] dx = 0 \quad (28)$$

$$\left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w + \dot{q} \Delta x = 0 \quad (29)$$

Utilizando-se uma aproximação de 1ª ordem para as derivadas da temperatura tem-se:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_e = \frac{T_e - T_p}{\delta x_e} \quad \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_w = \frac{T_p - T_w}{\delta x_w} \quad (30)$$

Substituindo-se a Eq. (30) nas derivadas da Eq. (29) resulta:

$$k_e \frac{(T_e - T_p)}{\delta x_e} - k_w \frac{(T_p - T_w)}{\delta x_w} + \dot{q}\Delta x = 0 \quad (31)$$

Colocando-se as temperaturas em evidência tem-se:

$$T_p \left(\frac{k_e}{\delta x_e} + \frac{k_w}{\delta x_w} \right) = T_e \left(\frac{k_e}{\delta x_e} \right) + T_w \left(\frac{k_w}{\delta x_w} \right) + \dot{q}\Delta x \quad (32)$$

Ou de outra forma, substituindo-se os termos entre parênteses por coeficientes simplificados resulta a equação:

$$a_p T_p = a_e T_e + a_w T_w + b \quad (33)$$

Assim tem-se os coeficientes das temperaturas (a) e termo independente (b) dados por:

$$a_p = \frac{k_e}{\delta x_e} + \frac{k_w}{\delta x_w}$$

$$a_e = \frac{k_e}{\delta x_e}$$

$$a_w = \frac{k_w}{\delta x_w}$$

$$b = \dot{q}\Delta x \quad (34)$$

A Eq. (33) é resolvida pelo algoritmo de Thomas ou método TDMA; é um método linha a linha que, resolve cada linha sendo conhecidas as temperaturas das duas linhas vizinhas. No caso de um problema unidimensional este método é direto, sendo que para problemas bi e tridimensionais é iterativo sendo processado linha a linha e coluna a coluna.

3. Metodologia

Neste trabalho a simulação numérica foi adaptada a partir do algoritmo desenvolvido por Moura (1998) para a identificação de propriedades radiativas. Nesta análise utilizou-se somente a parte dita “direta” deste código, sendo desenvolvido neste trabalho o código para a condução de calor em regime permanente acoplado à ETR.

Estudaram-se dois tipos de materiais: o vidro e o aerogel, levando-se em conta as premissas enumeradas abaixo para análise do problema:

- Para o aerogel considerou-se o caso de comportamento isotrópico conforme Siegel e Spuckler (1994a e 1994b) em relação às direções do espalhamento (função de fase);
- O feixe incidente foi considerado do tipo colimado incidindo perpendicularmente à face;
- Foi utilizada a quadratura de Radau modificada para determinar a distribuição das intensidades (Moura, 1998);
- A malha utilizada para divisão da espessura do meio foi a malha regular onde todos os volumes possuem a mesma dimensão Δx ; existe a possibilidade de utilização de outras malhas não regulares que propiciam um refinamento maior em uma determinada região, como por exemplo a malha de Tchebycheff que refina as regiões próximas das extremidades;
- A variação da intensidade do feixe ao longo do volume foi considerada linear;
- Os índices de refração foram considerados constantes com a temperatura, tendo sido adotados valores médios o mesmo acontecendo com os coeficiente de condutividade térmica.

Estudou-se três materiais com propriedades físicas distintas: vidro comercial flotado e aerogel com massa específica $m=5 \text{ kg/m}^3$ e emissividades $\varepsilon=0,04$ e $\varepsilon=0,74$ (Tab. 1) (Heinemann *et al.*, 1996). Todas as propriedades da Tab. 1 referem-se a uma temperatura média de 300K. As temperaturas das faces para cada caso de simulação foram calculadas a partir dos valores de N e τ , mantidos fixas as demais grandezas (ω , β , k , n).

Tabela 1. Propriedades físicas dos materiais considerados nas simulações.

Materiais	Albedo (ω)	Coef. extinção (β) [m^{-1}]	Condutividade térmica (k) [W/mK]	Índice de refração (n)
Vidro floatado	0	50 [1]	1,5 [2]	2 [3]
Aerogel 1 [4]	0,90	10	1,5	2
Aerogel 2 [4]	0,90	10	0,8	2

[1] Nicolau e Maluf – 2001 [2] Brewster, 2002 [3] McCluney - 1994 [4] Heinemann *et al.* - 1996

O critério de convergência adotado foi o de uma variação menor que 10^{-10} K para duas iterações sucessivas para o perfil de temperatura (tep); para se evitar a divergência foi inserida no programa uma relaxação para o divergente do fluxo radiativo (\dot{q}), onde apenas uma parcela da iteração anterior era incorporada à iteração atual.

4. Resultados obtidos e discussão

Apresenta-se na seqüência uma análise comparativa entre aerogéis 1 e 2 e o vidro, considerando-se várias espessuras para o meio e o caso de feixe incidente. Os fluxos de calor referem-se à face direita e a temperatura corresponde à posição central do meio.

A Fig. 4 apresenta um grande decaimento do fluxo total adimensional para os três materiais até a espessura de cerca de 0,010 m, tendendo a ficar linear após este ponto.

Na Fig. 5 verifica-se uma diminuição da temperatura no centro do meio bem mais acentuada no caso do vidro à medida que se aumenta a espessura. Comparando-se o aerogel 1 com o aerogel 2 fica evidente o efeito da diferença de condutividade térmica (k) entre eles à medida que a espessura do meio aumenta.

A Fig. 6 apresenta uma comparação percentual do fluxo de calor total (com radiação e condução) na face direita entre o aerogel (1 e 2) e o vidro. Esta diferença é calculada pela relação entre o fluxo de calor total calculado para o aerogel com o fluxo de calor total calculado para o vidro com a mesma espessura. Verifica-se uma redução expressiva do fluxo principalmente no caso do aerogel 2, chegando próximo a 30% para a espessura de 0,025 m, confirmando assim suas propriedades de isolamento térmico, principal objeto deste estudo.

Analogamente, na Fig. 7 tem-se a comparação percentual da temperatura na posição central da espessura entre o aerogel (1 e 2) e o vidro. Neste caso as temperaturas são sempre superiores às do vidro. Verifica-se um crescimento das curvas até a espessura aproximada de 0,0155 m, voltando a cair a partir deste ponto.

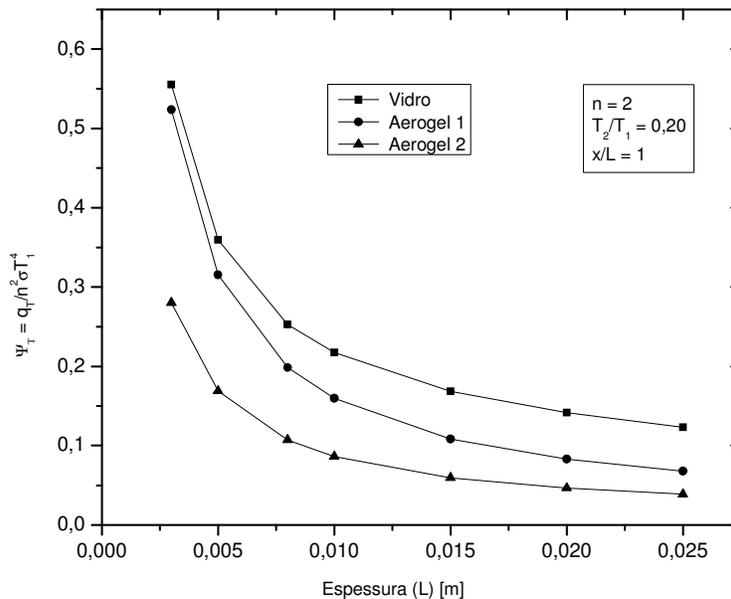


Figura 4. Distribuição do fluxo total adimensional para condução e radiação acoplados em função da espessura do meio (L) na face direita ($x/L=1$) para o vidro e aerogel, com relação de temperatura das faces $T_2/T_1=0,20$ e $n=2$.

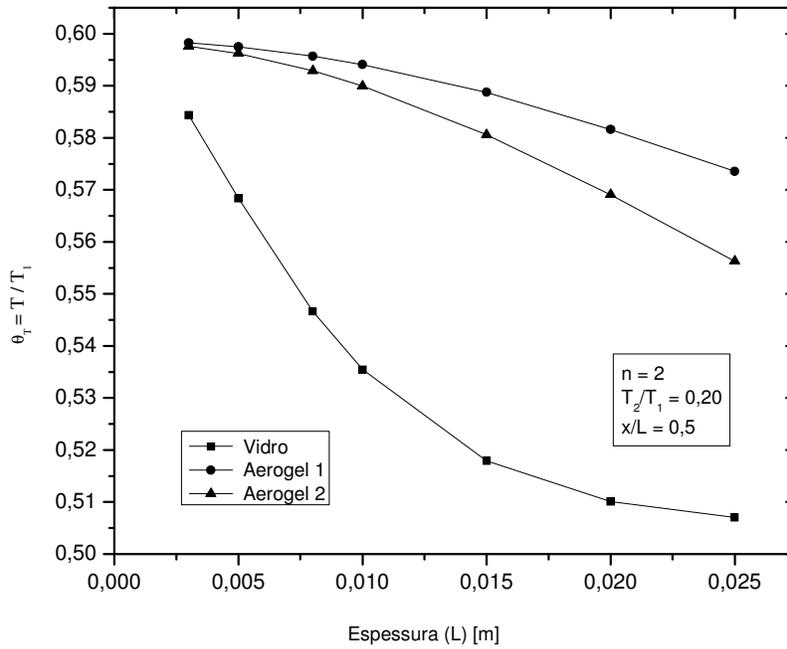


Figura 5. Distribuição da temperatura adimensional para condução e radiação acoplados em função da espessura do meio (L) na posição central ($x/L=0,5$) para o vidro e aerogel, com relação de temperatura das faces $T_2/T_1=0,20$ e $n=2$.

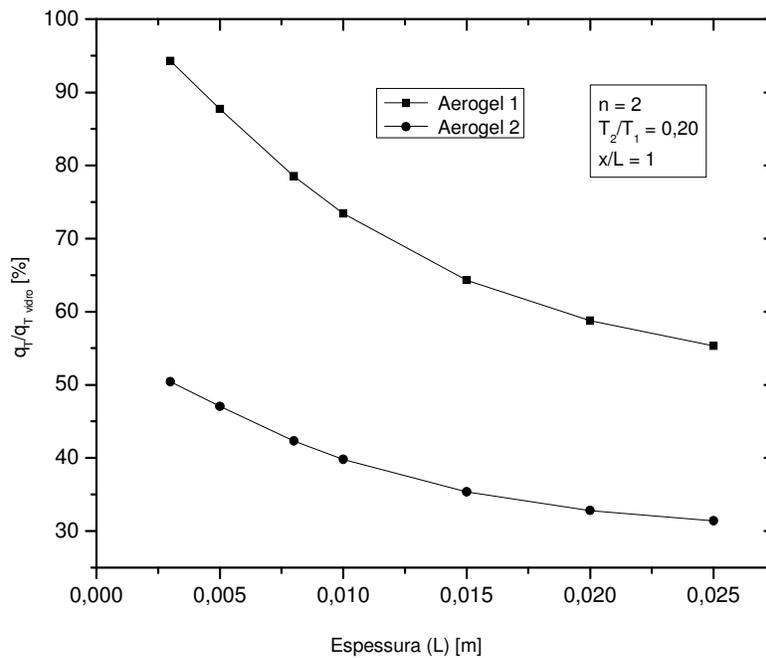


Figura 6. Comparação do fluxo de calor total dos aerogéis 1 e 2 com o vidro para condução e radiação acoplados em função da espessura do meio (L) na face direita ($x/L=1$) com relação de temperatura das faces $T_2/T_1=0,20$ e $n=2$.

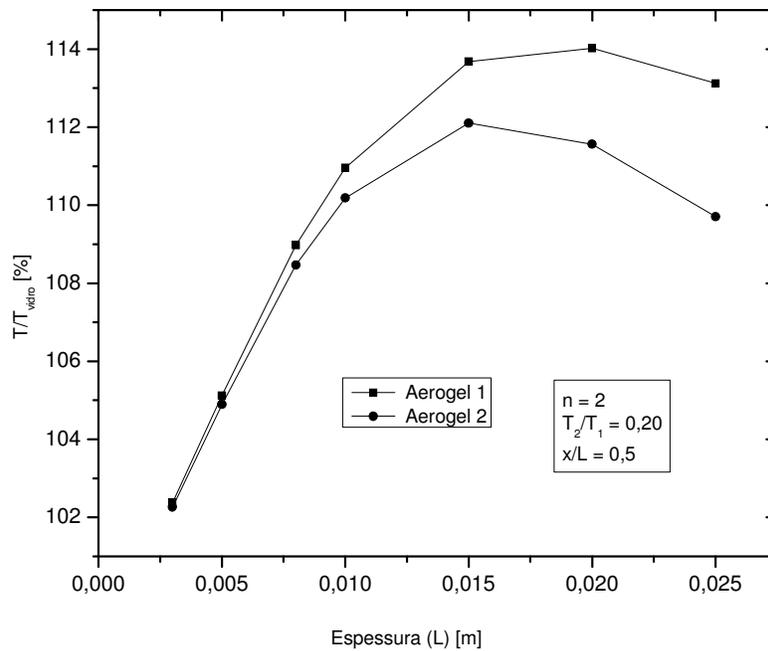


Figura 7. Comparação da temperatura na posição central ($x/L=0,5$) dos aerogéis 1 e 2 com o vidro para condução e radiação acoplados em função da espessura (L) com relação de temperatura das faces $T_2/T_1=0,20$ e $n=2$.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se um estudo da transferência de calor em meios semitransparentes com índice de refração diferente da unidade, comparando-se dois casos de materiais em especial: o vidro e o aerogel, sendo este último objeto de pesquisas que visam à substituição do vidro em diversas aplicações. Dois casos de aerogel foram estudados: aerogel 1 e aerogel 2, sendo que se diferenciam apenas pela condutividade térmica (k).

O modelo matemático adotado e o código computacional desenvolvido mostraram-se adequados para a representação do fenômeno de condução e radiação acopladas; o programa foi testado através da comparação dos resultados obtidos com a solução exata apresentada pela literatura e publicações específicas.

A análise comparativa entre os aerogéis 1 e 2 e o vidro para o caso de feixe incidente considerando-se várias espessuras mostrou uma grande redução do fluxo de calor para os aerogéis confirmando suas aplicações como bons isolantes térmicos; as temperaturas no centro do meio por sua vez resultaram ligeiramente maiores para os aerogéis, principalmente para as espessuras intermediárias.

5. Referências

- Borges, M. T. C. M., 2004, "Determinação de propriedades radiativas espectrais de vidros e películas", Dissertação de Mestrado. UFSC, Florianópolis, SC, Brasil.
- Barker, C. e Sutton, W. H., 1985, "The transient radiation and conduction heat transfer in a gray participating medium with semitransparent boundaries", Radiation Heat Transfer, vol. 49.
- Brewster, M.Q., 1992, "Thermal radiative transfer and properties", Ed. John Wiley & Sons, Inc., 543p., New York.
- Glass, D. E., Özisik, M. N. e McRae, D. S., 1987, "Combined conduction and radiation with flux boundary condition for a semitransparent medium covered by thin radiating layers", J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, Vol. 38, Nº 3, pp. 201-208.
- Heinemann, U., Caps, R. e Fricke, J., 1996, "Radiation-conduction interaction: an investigation on sílica aerogels", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol 39, Nº 10, pp. 2115-2130.
- McCluney, R., 1994, "Introduction to radiometry and photometry", Artech House, Boston, 402p..
- Moura, L.M., 1998 "Identification des proprietes radiatives des materiaux semi-transparents diffusants en situation de non-symetrie azimutale du champ radiatif", Thèse de doctorat n° 98ISAL0059, INSA de Lyon, Lyon. 217p..
- Moura, L.M., 2002, "Determinação das propriedades radiativas de materiais com índice de refração diferente da unidade", Monografia apresentada para obtenção do título de professor titular da PUCPR, Curitiba, PR.
- Moura, L.M., Baillis, D. e Sacadura, J.F., 1998, "Análise do método de ordenadas discretas: discretização espacial", In: Encontro Nacional de Ciências Térmicas (ENCIT98).

- Moura, L.M., Baillis, D. e Sacadura, J.F., 1997, "Analysis of the discrete ordinate method: angular discretization", 14th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, COB1425, Bauru, Brazil, December 8-12th.
- Nicolau, V.P. e Maluf, F.P., 2001, "Determination of radiative properties of commercial glass", 18th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Florianópolis, SC, 7-9 Novembro.
- Pfommer, P., Lomas K. J., Seale C. e Kupke C. H. R., 1995, "The radiation transfer through coated and tinted glazing", Solar Energy, vol. 54, No 5, pp. 287-299.
- Ruperti, N. J., 1996 "Etude du problème inverse de conduction-rayonnement de la chaleur", Thèse de doctorat n° 96ISAL0041, INSA de Lyon, Lyon, 152p..
- Siegel, R. e Howell, J. R., 2002, "Thermal radiation heat transfer", Taylor & Francis, 4a edição, 868p., New York, NY.
- Siegel, R. e Spuckler, C. M., 1994a, "Approximate solution methods for spectral radiative transfer in high refractive index layers", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 37, pp. 403-413.
- Siegel, R. e Spuckler, C. M., 1994b "Effects of refractive index and diffuse or specular boundaries on a radiating isothermal layer". Journal of Heat Transfer, vol. 116, August.
- Siegel, R. e Spuckler, C. M., 1993, "Variable refractive index effects on radiation in semitransparent scattering multilayered regions", Journal of Thermophysics and Heat Transfer, vol. 7, No 4, Oct.-Dec.

ANALYSIS OF THE HEAT TRANSFER IN GLASS COMPARED TO THE AEROGEL

Agnaldo Luís Guolo

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PUCPR – Rua Imaculada Conceição, 1155 – Prado Velho, Curitiba –PR - Brasil
agnaldo.luiz@csn.com.br

Luís Mauro Moura

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PUCPR – Rua Imaculada Conceição, 1155 – Prado Velho, Curitiba –PR - Brasil
Luis.moura@pucpr.br

Abstract

This work presents a formulation to study the heat transfer through semitransparent absorbing, emitting and scattering media, where two types of materials were considered: the glass and the aerogel. It was considered the process of conduction and radiation combined in a one-dimensional geometry (slab) with a collimated irradiation incident perpendicularly on one of the surfaces, in steady state. The computational routine developed allows the analysis of the influence of each process (conduction/radiation) on the total heat transfer through the media, as well as the effect of thermal insulation of the Aerogel compared to the Glass in certain temperatures of the faces.

Keywords: Aerogel, conduction and radiation heat transfer, energy efficacy.