

## UMA FORMULAÇÃO NUMÉRICA PARA O ACOPLAMENTO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO E RADIAÇÃO EM ISOLANTES TÉRMICOS UTILIZADOS EM EDIFICAÇÕES

Romulo Ruiz Gasparini<sup>1</sup> & Andrea Sartori Jabur<sup>2</sup>

1-SANEPAR Unidade de Serviço de Projetos e Obras de Curitiba e Região Metropolitana; 2-UTFPR Campus Pato Branco - Coordenação em Edificações - Área de Hidráulica, Hidrologia e Saneamento

**Resumo** - Neste trabalho é analisado o uso da lã de vidro como isolante térmico em edificações através de um modelo numérico. O código numérico desenvolvido para este problema, em linguagem FORTRAN, considera que a transferência de calor por condução, combinada com a radiação, através do meio, ocorre em um espaço unidimensional e em regime transiente. Para efeito de simulação, são considerados dois dias distintos: o primeiro com temperaturas elevadas, típico de verão e o segundo com temperaturas mais amenas, típico de inverno. A variação da emissividade das faces da lã de vidro, com relação ao fluxo total de calor, é analisada, com intuito de se utilizar outros materiais no envoltório da lã de vidro. Os resultados da simulação da lã de vidro são comparados com alguns materiais utilizados na construção civil, com intuito de demonstrar a viabilidade de seu uso em edificações.

**Palavras-Chave:** isolantes térmicos, condução, radiação.

## HEAT TRANSFER BY CONDUCTION AND RADIATION IN THERMAL INSULATORS USED IN BUILDINGS

**Abstract-** In this paper is analyzed the use of the glass wool as isolation material in building through a numerical model. The numerical model developed to this case, in FORTRAN, considers the conduction heat transfer coupling radiation, through the material, occur in a one-dimensional space and transient state. Two test cases are considered for two distinct days: first one, with high temperatures, representing a summer day; second one, with low temperatures, representing a winter day. The radiative proprieties variation in the glass wool faces, with relation to the total heat transfer, is analyzed, with intention of if using other materials in the wrap of the glass wool. The results of glass wool simulation are compared with others construction materials, with intention to demonstrate the viability of its use in buildings.

**KeyWord:** insulation materials, conduction, radiation.

**ATENÇÃO:** O presente trabalho apresenta dificuldade de leitura e interpretação, pois os autores intercalaram símbolos e fórmulas matemáticas no corpo do texto, entretanto, por sua relevância, um esforço foi realizado para transmitir a maior parte do contexto. Entre em contato com o autor para uma cópia integral não oficial do trabalho (nota do Editor).

### 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o setor governamental tem investido em pesquisa, normalização e legislação para que o consumo energético no País seja reduzido sem prejudicar nosso conforto, evitando assim grandes investimentos em geração de energia elétrica. É o caso do PROCEL (Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica), com atuação em diferentes áreas da sociedade, inclusive a residencial, visando o uso racional de energia. (Lamberts et al. (1997))

Segundo o PROCEL, cerca de 20% da produção nacional de energia elétrica é utilizada em edifícios comerciais e públicos e 29% em edifícios residenciais. No setor

residencial, o consumo de energia para o condicionamento de ar é da ordem de 7% do total, sendo considerado um valor baixo, mas cresce significativamente com o aumento do poder aquisitivo da população. (Lamberts et al. (1997))

Cabe salientar que no condicionamento o desperdício de energia é grande e as maneiras de reduzir o consumo são fáceis e sem grandes investimentos. O emprego de materiais com maior resistência térmica poderia representar, em muitos casos, uma grande redução no consumo de energia elétrica em edificações com ambientes climatizados e também representar um maior conforto dos ocupantes de edificações sem

condicionamento de ar, já que estes materiais proporcionam maior isolamento térmico do ambiente a ser ocupado, diminuindo as trocas de calor com o meio externo.

Por isso, analisar a transferência de calor por condução e radiação em edificações, principalmente através de sua cobertura, já que a maior parte da radiação solar incide diretamente sobre essa parte da construção, apresenta-se como uma ferramenta para se obter o uso racional de energia elétrica em ambientes climatizados e melhorar o conforto térmico de ambientes não climatizados.

O acoplamento de condução e radiação para a determinação da transferência de calor em edificações com uso de isolamento térmica se faz necessário devido aos materiais isolantes em muitos

casos serem considerados como um meio semitransparente, ou seja, permite a passagem dos dois tipos de transferência de calor.

A proposta deste trabalho é verificar numericamente a transferência de calor através de um material isolante localizado no interior de uma edificação, mais especificamente em um ático residencial.

Nesta formulação, as paredes e a base junto ao solo da residência são consideradas como sendo superfícies adiabáticas.

### 1.1 Revisão da literatura

Alguns trabalhos sobre análise da transferência de calor por condução e radiação através de materiais isolantes do tipo lâ de vidro são encontrados na literatura.

Winiarski e O Neal (1996) verificaram a transferência de calor por condução e radiação, através de um ático residencial com a utilização de materiais isolantes em diferentes pontos no interior deste ático, utilizando um modelo numérico, em regime permanente, resolvido para cada passe de hora e com a validação dos resultados através de um modelo experimental. Os resultados comprovaram que o menor fluxo de calor obtido no ático foi através do posicionamento do material isolante na parte inferior do ático residencial, ou seja, sobre a laje ou forro da residência.

Harris et al. (2003) analisaram a transferência de calor através de um material isolante de fibra de vidro, sobre a laje da residência. A lâ de vidro foi revestida por uma resina fenólica. Esta resina tem por finalidade à absorção da umidade dispersa dentro do material. Os resultados foram apresentados para um dia típico de verão e para um dia típico de inverno, sendo que, com o aumento do peso do revestimento da resina sobre o material isolante, houve uma diminuição do fluxo de calor através do meio. As equações básicas de espécie, difusão de calor e transporte radiativo, foram resolvidas simultaneamente em regime transiente aplicando um volume de controle unidimensional no material isolante.

## 2 FORMULAÇÃO

Para um meio semitransparente, com geometria

unidimensional cartesiana, absorvente, difuso, com propriedades radiativas constantes, em equilíbrio termodinâmico local e com simetria azimutal, a equação da transferência radiativa (ETR) pode ser expressa da seguinte maneira, segundo Moura (2002):

$$\mu \frac{\partial I(\tau, \mu)}{\partial \tau} + I(\tau, \mu) = (1 - \omega) I^o(T) + \frac{\omega}{2} \left[ \int_0^1 I(\tau, \mu') p(\mu', \mu) d\mu' + \int_0^1 I(\tau, -\mu') p(\mu', -\mu) d\mu' \right] \quad (1)$$

Onde  $\tau$  é a espessura ótica do meio, sendo que este termo representa a distancia a qual a intensidade radiativa percorre ao longo do meio,  $I$  o ( $T$ ) é a intensidade de radiação emitida pelo corpo negro à temperatura do meio,  $\omega$  é o albedo,  $p$  é a função de fase e os dois termos integrais representam o ganho por difusão. A ETR se divide em quatro termos, conforme a equação 1. O primeiro termo expressa a variação da intensidade radiativa no meio, sendo este termo a determinar.

O segundo termo expressa a radiação absorvida pelo meio, sendo que essa parcela auxilia no aumento da temperatura do meio. O terceiro termo expressa a radiação emitida em todas as direções pelas faces do meio e o quarto termo expressa a intensidade radiativa espalhada em todas as direções, sendo que este espalhamento é devido à difusão e a retro-difusão da intensidade radiativa no meio.

Considerando como condições de contorno as faces do material isolante, tem-se que as intensidades radiativas nas faces podem ser dadas por, segundo Harris (2003):

$$\tau = 0 \rightarrow I(0, \mu) = \rho_{fw} I(0, -\mu) + (1 - \rho_{fw}) n^2 I^o(T_{fw}) \Rightarrow \mu > 0 \quad (2)$$

$$\tau = \tau_0 \rightarrow I(\tau_0, \mu) = \rho_{fe} I(\tau_0, \mu) + (1 - \rho_{fe}) n^2 I^o(T_{fe}) \Rightarrow \mu < 0 \quad (3)$$

Onde  $\rho_{fw}$  é a refletividade da superfície a oeste,  $\rho_{fe}$  é a refletividade da superfície a leste,  $T_{fw}$  e  $T_{fe}$  são respectivamente as temperaturas nas superfícies a oeste e a leste. As condições de contorno, de ambas as faces, são divididas em dois termos, conforme pode ser visto nas equações 2 e 3. O primeiro termo refere-se a intensidade radiativa que chega na face e sofre reflexão especular, ou seja, em apenas uma direção. O segundo termo refere-se a intensidade radiativa emitida pela face, sendo que essa emissão tem intensidade igual em todas as direções, ou seja, é uma emissão isotrópica.

A solução da ETR através da solução pelo método das ordenadas discretas, é constituída de duas etapas: i) uma discretização angular, sendo o termo integral substituído por uma soma quadrática das intensidades radiativas. Desta maneira, obtém-se um conjunto de equações diferenciais parciais de primeira ordem; ii) uma discretização espacial, considerando um volume de controle, para a solução das equações parciais.

Considera-se uma função de interpolação linear para o cálculo da variação da intensidade radiativa no interior do meio, conforme proposto por Moura (2002). Obtém-se, a partir da equação (1), uma equação discretizada na seguinte forma:

$$I_{e,j} = \frac{1}{(1+0.5\alpha_j)} [0.5\alpha_j S_{P,j} + (1-\alpha_j + 0.5\alpha_j) I_{w,j}] \quad (4)$$

Sendo que:

$$\alpha_j = \frac{\Delta T_P}{\mu_j}; \quad S_{P,j} = (1-\omega) I^0(T_P) + \frac{\omega}{2\beta} \left[ \sum_{n=1}^N w_n (p_{w,j} I_{P,n} + p_{e,j} I_{P,-n}) \right] \quad (5)$$

Onde o índice P representa o centro do volume situado entre as faces de índice w a oeste e e a leste. Na equação (4), o valor de I w, j é um valor conhecido, determinado através da condição de contorno da face à oeste, conforme a equação 2. Com isso, calcula-se I P, j, conforme a equação 6:

$$I_{P,j} = \frac{1}{1+0.5\alpha_j} (0.5\alpha_j S_{P,j} + I_{w,j}) \quad (6)$$

A determinação do valor de I P, j é realizada através de várias iterações, sempre atualizando o termo fonte S P, j. Os ponderações ou pesos são representados por w<sub>n</sub> e são associados às direções μ<sub>n</sub> da difusão da radiação no interior do meio.

A passagem de calor ou fluxo de calor por radiação q<sub>rad</sub> através de uma seção de um meio semitransparente é definida pela equação 7:

$$q_{rad,P}^n = 2\pi \sum_{n=1}^N w_n \mu_n (I_{P,n} - I_{P,-n}) \quad (7)$$

Onde a equação 7 representa a integração da intensidade radiativa I(τ, μ) em um determinado volume.

A passagem da radiação no interior de um meio semitransparente gera calor dentro deste material, sendo que esta parcela contribui para a alteração da temperatura interna deste material. O calor gerado internamente q<sub>rad</sub> é definido pela equação 8.

$$\dot{q}_{rad,P} = \kappa \left[ 4\pi I^0(T) - 2\pi \sum_{n=1}^N w_n (I_{P,n} + I_{P,-n}) \right] \quad (8)$$

### 2.1 Equação de balanço de energia

A equação de balanço de energia ou difusão de calor, para um volume de controle em sistemas de coordenadas cartesianas em um espaço unidimensional, considerando o acoplamento de condução e radiação, é dada, pela equação 9:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_P \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{q}_{rad} \quad (9)$$

Onde ρ é a densidade do volume de controle, c é o calor específico do volume de controle, k a condutividade térmica do volume de controle, k P é a condutividade térmica do volume de controle e ΔT é variação da temperatura do volume de controle. O termo representa o calor gerado internamente devido à passagem da radiação no meio, sendo este termo considerado como um termo fonte da equação de difusão de calor. A equação 9 foi proposta por Harris et al. (2003), para a solução da transferência de calor por condução e radiação através de um isolante térmico utilizado em lajes residenciais.

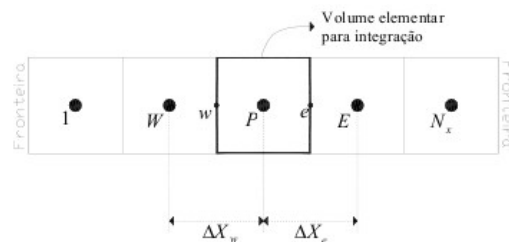


Figura 1 – Malha para o problema unidimensional de difusão de calor.

A equação 9 não tem solução analítica, sendo necessário à utilização de métodos numéricos para se determinar o fluxo de calor através deste meio. Uma técnica bastante utilizada na solução deste tipo de problema, segundo Maliska (1995), é o método de volumes finitos que consiste subdividir o meio em vários volumes, conforme a figura 1.

Integrando a equação 9 no tempo e espaço, sendo que para a temperatura usou-se uma função linear para a interpolação e para o tempo usou-se uma formulação explícita para a interpolação, obtém-se a seguinte equação para a solução numérica do perfil de temperatura através do meio:

$$T_{P(t+1)} = Fo_E T_{E(t)} + Fo_W T_{W(t)} + (1 - 2Fo_P) T_{P(t)} + \dot{q}_{rad,P} \frac{\Delta x}{\rho c} \quad (10)$$

Onde Fo é o número de Fourier do volume de integração, TP (t + 1) é a temperatura no centro do volume de integração no tempo t + Δt, TP (t) é a temperatura no centro do volume de integração no tempo t e TE (t) e TW (t) são as temperaturas no centro do volume a leste e oeste do volume de integração no tempo t, respectivamente.

Após conhecer os valores do perfil de temperatura no volumes internos, pode-se determinar o fluxo "

de calor por condução q<sub>cond</sub>, P através dos volumes internos P, conforme a figura 2, bastando apenas aplicar a lei de Fourier neste ponto, conforme a equação 11.

$$q''_{cond,P} = -\frac{k_P(T_E - T_W)}{2\Delta x} \quad (11)$$

O fluxo total de calor nas interfaces dos volumes de controle é a soma dos fluxos por radiação e condução, conforme a equação 12:

$$q''_{total,P} = q''_{rad,P} + q''_{cond,P} \quad (12)$$

### 3 RESULTADOS

A tabela 1 mostra a energia acumulada no interior da residência, para o dia típico de verão e a energia perdida para o ático, para o dia típico de inverno, da lâ de vidro, em comparação a alguns materiais comumente utilizados na construção civil. Para ambos os dias, a utilização da lâ de vidro se mostrou mais eficiente, em relação aos demais materiais, sendo que, em uma residência a qual o usuário deseje utilizar um sistema de ar condicionado, a carga térmica através deste material é menor, o que favorece em um sistema de refrigeração menor.

Tabela 1 - Comparativo da energia acumulada devido à transferência de calor, para alguns materiais utilizados na construção civil.

Período	Material	Aumento (%)
dia típico de verão	Lã de Vidro	
	Isopor	10,2
	Madeira Compensada	230,6
	Madeira de Lei	230,6
	Gesso	368,3
dia típico de inverno	Concreto	3756,8
	Lã de Vidro	
	Isopor	16,8
	Madeira Compensada	250,5
	Madeira de Lei	250,5
	Gesso	396,5
	Concreto	3988,8

No caso de uma residência sem um sistema de ar condicionado, pode-se dizer que a utilização da lâ de vidro favorece um maior conforto térmico dos usuários, pois em ambos os dias, a residência tem menores trocas

térmicas com o ático residencial. Na construção civil, a lâ de vidro normalmente é executada com um outro material, como por exemplo, o concreto, mas esta comparação considerou o material individualmente.

### 4 CONCLUSÕES

Neste artigo, foi verificada a transferência de calor por condução e radiação, através da lâ de vidro, comumente utilizado como isolante térmico, para dois dias distintos: dia típico de verão e dia típico de inverno.

A emissividade das faces exerce influência no valor do fluxo total de calor para casos onde a radiação tem predominância sobre a condução, onde se observou uma diferença de 70,1% entre os casos. Para os casos onde a condução tem predominância sobre a radiação, caso típico da lâ de vidro, a variação da emissividade das faces exerce pouca influência o valor a transferência total de calor, sendo que esta diferença diminui para 1,8%.

A lâ de vidro se mostrou eficiente, com relação à transferência de calor, em comparação aos materiais de utilizados na construção civil, sendo que, pode-se afirmar que a lâ de vidro favorece um melhor conforto térmico dos usuários de uma residência que utilize este material e para ambientes climatizados o seu auxílio é em um menor dimensionamento do sistema de climatização.

### 5 REFERÊNCIAS

- HARRIS, K. T.; ROUX, J. A. and McCARTY, T. A. Phenolic Binder Content Impact on Total Heat Transfer for Fibrous Insulation Batts. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, V. 26, N. 4, p. 237-257, 2003.
- LAMBERTS, R. Eficiência Energética na Arquitetura. Roberto Lamberts, Luciano Dutra e Fernando Oscar Ruttkay Pereira. São Paulo: PW Editores, 1997. 192p.
- MALISKA, C. R. Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1995. 424p.
- MOURA, L. M. Identification des Propriétés Radiatives des Matériaux Semi-Transparents Diffusants en Situation de Non-Symétrie Azimutale du Camp Radiatif. Thèse de Doctorat, 98ISAL0059, INSA Lyon, France, 1998.
- WINIARSKI, W. W. and O NEAL, D. L. A Quasi-Steady-State Model of Attic Heat Transfer with Radiant Barriers. *Energy and Buildings*, V. 24, p 183-194, 1996.