

MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E DE UMIDADE ATRAVÉS DA INTERFACE ENTRE MEIOS POROSOS DE DIFERENTES HIGROSCOPICIDADES

Nathan Mendes

Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR/CCET), Rua Imaculada Conceição, 1155. Curitiba-PR, 80.215-901
nmendes@ccet.pucpr.br

Paulo C. Philippi

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC-CTC-EMC), Campus Trindade, Florianópolis-SC, 88.040-900
philippi@lmpt.ufsc.br

Resumo. O modelo de Philip e DeVries, para modelação de transferência de calor e de umidade através de meios porosos, utiliza como potenciais motrizes os gradientes de temperatura e de conteúdo de umidade. No entanto, sabe-se que há descontinuidade no perfil de conteúdo de umidade na interface entre dois meios porosos, devido às suas diferentes funções de distribuição de volumes de poros. Para contornar este problema, alguns autores modificaram o modelo de Philip e De Vries de forma a utilizar como potencial motriz, além do gradiente de temperatura, o gradiente de pressão capilar ou o de umidade relativa. Apresenta-se neste artigo, uma formulação matemática que permite a utilização do conteúdo de umidade como potencial motriz para cálculo do transporte de umidade através da interface entre 2 meios porosos distintos. Por fim, analisa-se a influência dessa descontinuidade no perfil de conteúdo de umidade.

Palavras-chave. Meios Porosos, Descontinuidade na Interface, Simulação

1. Introdução

Um dos modelos mais difundidos e aceitos para estudo de transferência de calor e de umidade através de meios porosos é o modelo de Philip e DeVries (1957), o qual utiliza como potenciais motrizes os gradientes de temperatura e de conteúdo de umidade. Esse modelo foi concebido para modelar solos sem se preocupar com a transferência de umidade para um segundo meio poroso com propriedades distintas. No entanto, sabe-se que há descontinuidade no perfil de conteúdo de umidade na interface entre dois meios porosos, devido à diferença no comportamento higroscópico entre materiais distintos; materiais com maior higroscopicidade retêm um maior conteúdo de umidade para a mesma umidade relativa. Para modelar sistemas compostos por diferentes meios porosos, contornando o problema da presença da descontinuidade no perfil de conteúdo de umidade, alguns autores modificaram o modelo de Philip e De Vries de forma a utilizar como potencial motriz, além do gradiente de temperatura, o gradiente de pressão capilar ou o de umidade relativa. Dentre esses autores, pode-se citar Pedersen (1992) que utilizou o potencial de pressão capilar e Künzel (1995) que utilizou o potencial de umidade relativa no lugar do potencial de conteúdo de umidade. Os procedimentos utilizados por esses autores são corretos para se levar em conta essa descontinuidade do conteúdo de umidade na interface entre dois meios. No entanto, em códigos computacionais como UMIDUS (Mendes et al., 1999) e MOIST (Burch, 1993) as equações de transporte são escritas em termos de temperatura e conteúdo de umidade e modelos específicos devem ser utilizados para as interfaces entre materiais diferentes.

Assim, apresenta-se neste artigo um modelo matemático que permite levar em conta o fenômeno de descontinuidade na interface de meios com diferentes higroscopicidades, utilizando o conteúdo de umidade como potencial motriz.

Muito embora seja bem conhecido que quando dois materiais são pressionados um contra o outro sempre haverá espaços com ar devido à rugosidade dos materiais - o que não permitirá contato perfeito nem para o fluxo de calor nem para o de umidade - o único trabalho na literatura que tratou a resistência de contato para a umidade foi o de De Freitas (1996), com o desenvolvimento do código TRHUMIDADE. No entanto, esse código necessita de um parâmetro para descrever o fluxo máximo de umidade que passa pela interface, obtido experimentalmente.

Como o objetivo do presente trabalho é apresentar a modelagem matemática para que se possa utilizar o gradiente de conteúdo de umidade como potencial motriz mesmo na interface, descreve-se a formulação adaptada para a utilização do algoritmo MTDMA (MultiTridiagonal-Matrix Algorithm) proposto por Mendes e Philippi (2002). Devido a falta de informações sobre a resistência de contato, este artigo restringe-se à descrição do modelo propriamente dito e à análise da influência da descontinuidade no perfil de conteúdo de umidade.

2. Modelo matemático para a interface

Desconsiderando-se a resistência de contato tanto térmica como hídrica, pode-se afirmar que na interface entre dois materiais porosos denominados A e B as seguintes igualdades são válidas:

$$\begin{cases} (T)_A = (T)_B \\ (\psi)_A = (\psi)_B \end{cases}, \quad (1)$$

onde T é a temperatura e ψ é a pressão capilar.

Segundo a lei de Kelvin e a equação $(\psi)_A = (\psi)_B$, pode-se escrever,

$$\frac{\Re(T)_A}{Mg} \ln(\phi)_A = \frac{\Re(T)_B}{Mg} \ln(\phi)_B, \quad (2)$$

onde \Re é a constante universal dos gases, M , a massa molecular, ϕ a umidade relativa e g a gravidade. Como as temperaturas para ambos os materiais é a mesma na interface, a equação acima torna-se:

$$(\phi)_A = (\phi)_B; \quad (3)$$

o que significa dizer que a umidade relativa é a mesma. Em termos de concentração de vapor, pode-se afirmar que:

$$\left(\frac{\rho_v}{\rho_{v,sat}(T_A)} \right)_A = \left(\frac{\rho_v}{\rho_{v,sat}(T_B)} \right)_B \quad (4)$$

ou ainda, como as temperaturas são iguais:

$$(\rho_v)_A = (\rho_v)_B. \quad (5)$$

No entanto, como a pressão parcial do vapor d'água é baixa em relação a sua pressão de saturação, pode-se considerá-lo como gás perfeito ao escrever:

$$(\rho_v(s)) = \frac{P(s)M}{\Re T(s)},$$

onde s representa a interface entre 2 materiais. A equação acima também pode ser escrita como:

$$(\rho_v(s)) = \frac{P_s(s)}{T(s)} \frac{\phi(s)M}{\Re}. \quad (6)$$

Neste ponto, a concentração de vapor encontra-se expressa como uma função da temperatura e da umidade relativa. Por outro lado, o quociente entre a pressão de saturação e a temperatura pode ser escrito como um polinômio em termos de temperatura. Este quociente P_s/T pode ainda ser expresso como uma função linear da temperatura com pequeno erro dentro de uma certa faixa de temperatura, como é mostrado na Figura 1,

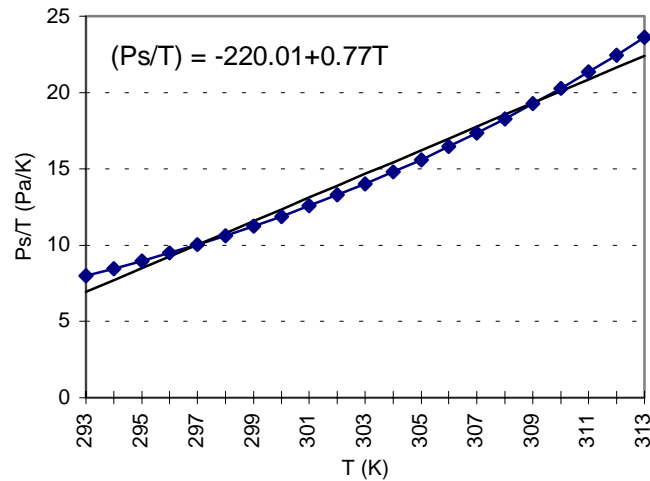


Figura 1. Linearização de $\frac{P_s}{T} = f(T)$.

Para atingir um maior grau de precisão ao usar a expressão linearizada, introduziu-se uma função residual $R(T)$,

$$R(T) = \frac{P_s}{T} - (AT + B), \tag{8}$$

onde A and B são os coeficientes angular e linear da reta que aproxima $P_s/T = AT + B$. O 1º termo do lado direito, razão P_s/T , é calculado através da correlação de pressão de saturação com temperatura.

Assim, através da igualdade abaixo,

$$\frac{P_s}{T} = R(T) + (AT + B), \tag{9}$$

a equação dos gases perfeitos para o vapor pode ser escrita como:

$$(\rho_v(s)) = \frac{(R(T) + (AT + B))\phi(s)M}{\mathfrak{R}} \tag{10}$$

Entretanto, para uma dada isoterma de equilíbrio, pode-se truncar a série de Taylor após o termo de segunda ordem, obtendo-se:

$$\phi(s) = \phi(s)^{prev} + \left(\frac{\partial\phi}{\partial\theta}\right)^{prev} (\theta(s) - \theta(s)^{prev}), \tag{11}$$

onde θ representa o conteúdo volumétrico de umidade.

Assim, substituindo-se a Eq. 10 em 11, pode-se reescrever a concentração de vapor como:

$$(\rho_v(s)) = \frac{(R(T) + (AT + B)) \left(\phi(s)^{prev} + \left(\frac{\partial\phi}{\partial\theta}\right)^{prev} (\theta(s) - \theta(s)^{prev}) \right) M}{\mathfrak{R}}, \tag{12}$$

ou ainda:

$$(\rho_v(s)) = \frac{\left(R(T)\phi(s)^{\text{prev}} + (AT + B)\phi(s)^{\text{prev}} + \left(\frac{P_s(s)}{T(s)} \right)^{\text{prev}} \left(\frac{\partial\phi}{\partial\theta} \right)^{\text{prev}} (\theta(s) - \theta(s)^{\text{prev}}) \right) M}{\mathfrak{R}}. \quad (13)$$

Logo, na interface, ao invés de escrever $(\rho_v)_A = (\rho_v)_B$ - Eq. 5, uma vez que $(T)_A = (T)_B$, é conveniente fazer:

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial\theta} \right)_A^{\text{prev}} (\theta_A(s) - \theta_A(s)^{\text{prev}}) = \left(\frac{\partial\phi}{\partial\theta} \right)_B^{\text{prev}} (\theta_B(s) - \theta_B(s)^{\text{prev}}), \quad (14)$$

a qual não depende mais explicitamente da temperatura em um dado instante.

Da Eq. 14, pode-se escrever que:

$$\theta_B(s) = C_1 \theta_A(s) + C_2, \quad (15)$$

onde,

$$C_1 = \frac{\left(\frac{\partial\phi}{\partial\theta} \right)_A^{\text{Prev}}}{\left(\frac{\partial\phi}{\partial\theta} \right)_B^{\text{Prev}}} \quad (16)$$

$$e \quad C_2 = \theta_B^{\text{Prev}} - C_1 \theta_A^{\text{Prev}}. \quad (17)$$

Por outro lado, na Figura 2, analisando-se o volume de controle da interface, pode-se calcular seu conteúdo de umidade médio por:

$$\theta_I = \frac{\delta x_w}{\delta x_w + \delta x_e} \theta_A + \frac{\delta x_e}{\delta x_w + \delta x_e} \theta_B,$$

onde δx_e e δx_w representam as distancias entre o centro do volume de controle do ponto I com as interfaces dos volumes de controle a leste e a oeste, respectivamente.

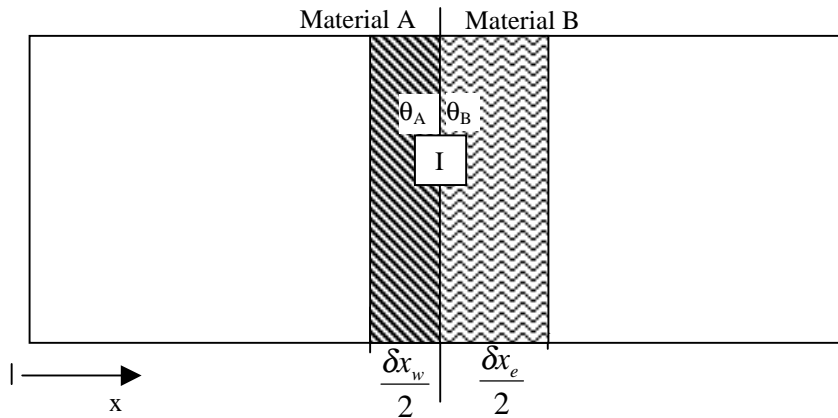


Figura 2. Representação esquemática do volume de controle na interface.

2.1. Equações de Conservação

As equações diferenciais parciais governantes no meio poroso em questão são originadas das leis de conservação de massa e de energia aplicadas à um volume de controle elementar. Para a umidade (vapor mais líquido), a expressão da conservação da massa pode ser escrita como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla(j/\rho_1), \quad (18)$$

onde o fluxo total de umidade, conforme Philip and De Vries (1957), é dado por:

$$\frac{j}{\rho_1} = -D_T \nabla T - D_\theta \nabla \theta - k_1 \hat{i}. \quad (19)$$

Substituindo a equação anterior na equação de balanço de massa, tem-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(D_\theta \nabla \theta_1) + \nabla(D_T \nabla T) + \frac{\partial K}{\partial z}. \quad (20)$$

Desprezando-se o termo de gravidade, a equação da conservação da massa pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(D_\theta \nabla \theta_1) + \nabla(D_T \nabla T), \quad (21)$$

Para o caso unidimensional, na interface I, tem-se:

$$\frac{\partial \theta_I}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{j}{\rho_1} \right), \quad (22)$$

onde o termo transiente de conteúdo de umidade na face, pode ser discretizado na forma implícita como:

$$\frac{\partial \theta_I}{\partial t} = \frac{\delta x_w}{\delta x_w + \delta x_e} \frac{\theta_A(s) - \theta_A^0(s)}{\Delta t} + \frac{\delta x_e}{\delta x_w + \delta x_e} \frac{\theta_B(s) - \theta_B^0(s)}{\Delta t} \quad (23)$$

ou ainda, em função apenas de θ_A :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_I}{\partial t} = & \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{\delta x_w}{\delta x_w + \delta x_e} + \frac{\delta x_e}{\delta x_w + \delta x_e} C_1 \right) \theta_A(s) + \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{\delta x_e}{\delta x_w + \delta x_e} C_2 \right) - \\ & \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{\delta x_w}{\delta x_w + \delta x_e} \right) \theta_A^0(s) - \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{\delta x_e}{\delta x_w + \delta x_e} \right) \theta_B^0(s) \end{aligned} \quad (24)$$

Por outro lado, o gradiente de fluxo de umidade pode ser discretizado por um esquema de diferenças centradas:

$$-\frac{\partial}{\partial x}(j) = \frac{j_w - j_e}{\Delta x}, \quad (25)$$

Desprezando o termo de gravidade da Eq. 19, os fluxos de vapor a oeste e a leste da interface podem ser escritos como:

$$\begin{aligned} \frac{j_w}{\rho_1} = & \frac{D_{\theta w}}{\delta x_w} (\theta_w - \theta_A(s)) + \frac{D_{T w}}{\delta x_w} (T_w - T_I) \text{ e} \\ \frac{j_e}{\rho_1} = & \frac{D_{\theta e}}{\delta x_e} (\theta_B(s) - \theta_E) + \frac{D_{T e}}{\delta x_e} (T_I - T_E), \end{aligned}$$

onde a temperatura da interface $T_I = T_A(s) = T_B(s)$.

Desta forma, substituindo θ_B , pode-se reescrever a equação da conservação da massa como:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\Delta x}{\Delta t} \left(\frac{\delta x_w}{\delta x_w + \delta x_e} + \frac{\delta x_e}{\delta x_w + \delta x_e} C_1 \right) + \frac{D_{\theta e}}{\delta x_e} C_1 + \frac{D_{\theta w}}{\delta x_w} \right] \theta_{P-}(s) + \left(\frac{D_{T_w}}{\delta x_w} + \frac{D_{T_e}}{\delta x_e} \right) T_P = \frac{D_{\theta e}}{\delta x_e} \theta_E + \frac{D_{\theta w}}{\delta x_w} \theta_W \\ & + \frac{D_{T_e}}{\delta x_e} T_E + \frac{D_{T_w}}{\delta x_w} T_W - \frac{\Delta x}{\Delta t} \left(\frac{\delta x_e}{\delta x_w + \delta x_e} C_2 \right) + \frac{\Delta x}{\Delta t} \left(\frac{\delta x_w}{\delta x_w + \delta x_e} \right) \theta_{P-}^0(s) + \frac{\Delta x}{\Delta t} \left(\frac{\delta x_e}{\delta x_w + \delta x_e} \right) \theta_{P+}^0(s) - \frac{D_{\theta e}}{\delta x_e} C_2, \end{aligned} \quad (26)$$

onde os conteúdos de umidade à direita e à esquerda da interface são, respectivamente:

$$\theta_{P-}(s) = \theta_A(s)$$

$$\theta_{P+}(s) = \theta_B(s)$$

Similarmente, para a equação da conservação de energia,

$$\rho_0 c_m \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L \rho_1 \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{TV} \frac{\partial T}{\partial x} + D_{\theta V} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right),$$

tem-se:

$$\begin{aligned} & \left(L \rho_1 \frac{D_{\theta V e}}{\delta x_e} C_1 + L \rho_1 \frac{D_{\theta V w}}{\delta x_w} \right) \theta_{P-} + \\ & \left(\rho_0 c_m \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{\lambda_e}{\delta x_e} + \frac{L \rho_1 D_{TV e}}{\delta x_e} + \frac{\lambda_w}{\delta x_w} + \frac{L \rho_1 D_{TV w}}{\delta x_w} \right) T_P = \\ & L \rho_1 \frac{D_{\theta V e}}{\delta x_e} \theta_E + L \rho_1 \frac{D_{\theta V w}}{\delta x_w} \theta_W + \\ & \left(\frac{\lambda_e}{\delta x_e} + \frac{L \rho_1 D_{TV e}}{\delta x_e} \right) T_E + \left(\frac{\lambda_w}{\delta x_w} + \frac{L \rho_1 D_{TV w}}{\delta x_w} \right) T_W + \rho_0 c_m \frac{\Delta x}{\Delta t} T_P^0 - L \rho_1 \frac{D_{\theta V e}}{\delta x_e} C_2. \end{aligned} \quad (27)$$

2.2. Procedimento de solução

Para a solução das equações governantes acopladas, utiliza-se o algoritmo MTDMA apresentado por Mendes e Philippi (2002), o qual as resolve simultaneamente.

Devido à complexidade do fenômeno e à falta de informações sobre a interface entre dois materiais porosos, supõe-se que exista continuidade hidráulica – não criando resistências adicionais - e que essa interface passa pelo centro do volume de controle. Assim, os coeficientes de transportes são avaliados na interface por médias harmônicas entre dois elementos consecutivos da malha; isto assegura que eles sejam avaliados dentro do mesmo material. Entretanto, a capacidade térmica é calculada como a soma das capacidades dos dois materiais que formam o volume de controle da interface.

Assim, para a interface I, tem-se os seguintes coeficientes para o MTDMA:

$$\begin{aligned} A(I) &= \left[\begin{array}{cc} \frac{\Delta x}{\Delta t} \left(\frac{\delta x_w}{\delta x_w + \delta x_e} + \frac{\delta x_e}{\delta x_w + \delta x_e} C_1 \right) + \frac{D_{\theta e}}{\delta x_e} C_1 + \frac{D_{\theta w}}{\delta x_w} & \frac{D_{T_e}}{\delta x_e} + \frac{D_{T_w}}{\delta x_w} \\ L \rho_1 \left(\frac{D_{\theta V e}}{\delta x_e} C_1 + \frac{D_{\theta V w}}{\delta x_w} \right) & \left(\frac{\lambda_e}{\delta x_e} + \frac{L \rho_1 D_{TV e}}{\delta x_e} + \frac{\lambda_w}{\delta x_w} + \frac{L \rho_1 D_{TV w}}{\delta x_w} + \rho_0 c_m \frac{\Delta x}{\Delta t} \right) \end{array} \right]; \\ B(I) &= \left[\begin{array}{cc} \frac{D_{\theta e}}{\delta x_e} & \frac{D_{T_e}}{\delta x_e} \\ L \rho_1 \frac{D_{\theta V e}}{\delta x_e} & \left(\frac{\lambda_e}{\delta x_e} + \frac{L \rho_1 D_{TV e}}{\delta x_e} \right) \end{array} \right]; \\ C(I) &= \left[\begin{array}{cc} \frac{D_{\theta w}}{\delta x_w} & \frac{D_{T_w}}{\delta x_w} \\ L \rho_1 \frac{D_{\theta V w}}{\delta x_w} & \left(\frac{\lambda_w}{\delta x_w} + \frac{L \rho_1 D_{TV w}}{\delta x_w} \right) \end{array} \right]; \\ D(I) &= \left[\begin{array}{c} \frac{\Delta x}{\Delta t} \left(\frac{\delta x_w}{\delta x_w + \delta x_e} \right) \theta_{P-}^0(s) + \frac{\Delta x}{\Delta t} \left(\frac{\delta x_e}{\delta x_w + \delta x_e} \right) \theta_{P+}^0(s) - \frac{\Delta x}{\Delta t} \left(\frac{\delta x_e}{\delta x_w + \delta x_e} C_2 \right) - \frac{D_{\theta e}}{\delta x_e} C_2 \\ \rho_0 c_m \frac{\Delta x}{\Delta t} T_P^0 - L \rho_1 \frac{D_{\theta V e}}{\delta x_e} C_2 \end{array} \right]. \end{aligned} \quad (28)$$

Deve-se lembrar, ainda, que a formulação para o volume de controle, referente ao nó à direita, imediatamente após a interface, deve ser corrigida para que o gradiente de conteúdo de umidade refira-se ao valor associado ao material B - $\theta_{P+}(I) = \theta_B$ - e não mais ao material A. Portanto, de uma forma genérica, pode-se escrever os coeficientes para qualquer nó i como:

$$\begin{aligned}
 A(I) &= \left[\begin{array}{c} \frac{\Delta x}{\Delta t} \left(\frac{\delta x_w}{\delta x_w + \delta x_e} + \frac{\delta x_e}{\delta x_w + \delta x_e} C_1 \right) + \frac{D_{\theta e}}{\delta x_e} C_1 + \frac{D_{\theta w}}{\delta x_w} \left(\frac{D_{T_e}}{\delta x_e} + \frac{D_{T_w}}{\delta x_w} \right) \\ L\rho_1 \left(\frac{D_{\theta ve}}{\delta x_e} C_1 + \frac{D_{\theta vw}}{\delta x_w} \right) \left(\frac{\lambda_e}{\delta x_e} + \frac{L\rho_1 D_{Tve}}{\delta x_e} + \frac{\lambda_w}{\delta x_w} + \frac{L\rho_1 D_{Tvw}}{\delta x_w} + \rho_0 c_m \frac{\Delta x}{\Delta t} \right) \end{array} \right]; \\
 B(I) &= \left[\begin{array}{c} \frac{D_{\theta e}}{\delta x_e} \quad \frac{D_{T_e}}{\delta x_e} \\ L\rho_1 \frac{D_{\theta ve}}{\delta x_e} \quad \left(\frac{\lambda_e}{\delta x_e} + \frac{L\rho_1 D_{Tve}}{\delta x_e} \right) \end{array} \right]; \quad C(I) = \left[\begin{array}{c} \frac{D_{\theta w}}{\delta x_w} C_3 \quad \frac{D_{T_w}}{\delta x_w} \\ L\rho_1 \frac{D_{\theta vw}}{\delta x_w} C_3 \quad \left(\frac{\lambda_w}{\delta x_w} + \frac{L\rho_1 D_{Tvw}}{\delta x_w} \right) \end{array} \right]; \quad (29) \\
 D(I) &= \left[\begin{array}{c} \frac{\Delta x}{\Delta t} \left(\frac{\delta x_w}{\delta x_w + \delta x_e} \right) \theta_{P-}^0(s) + \frac{\Delta x}{\Delta t} \left(\frac{\delta x_e}{\delta x_w + \delta x_e} \right) \theta_{P+}^0(s) - \frac{\Delta x}{\Delta t} \left(\frac{\delta x_e}{\delta x_w + \delta x_e} C_2 \right) - \frac{D_{\theta e}}{\delta x_e} C_2 + \frac{D_{\theta w}}{\delta x_w} C_4 \\ \rho_0 c_m \frac{\Delta x}{\Delta t} T_P^0 - L\rho_1 \left(\frac{D_{\theta ve}}{\delta x_e} C_2 + \frac{D_{\theta vw}}{\delta x_w} C_4 \right) \end{array} \right].
 \end{aligned}$$

No entanto, para tornar o algoritmo computacionalmente prático, deve-se primeiramente calcular os coeficientes C_1 e C_2 e lembrar dos seguintes casos: i) Se o nó for o nó da interface, faça $C_3=1$ e $C_4=0$; ii) Se o nó for imediatamente superior ao nó da interface faça: $C_3 = C_1$ e $C_4 = C_2$. No entanto, $C_1=1$ e $C_2=0$; iii) Se não (nó interno qualquer) faça $C_1=C_3=1$ e $C_2=C_4=0$.

3. Resultados

A fim de verificar o modelo apresentado, elaborou-se um programa computacional, permitindo a comparação entre o modelo apresentado e um modelo que ignora a presença da descontinuidade no conteúdo de umidade na interface entre 2 materiais porosos. O estudo de caso abordado trata-se de uma parede plana composta por 3 camadas: 2 cm de argamassa, 10 cm de tijolo e 2 cm de argamassa. As propriedades utilizadas para esses materiais foram obtidas por Perrin (1985). A condição de contorno adotada para as superfícies externas foi de 3ª espécie (convecção com coeficiente de troca de calor constante de $5W/m^2\cdot K$, temperatura de $25^\circ C$ e umidade relativa de 60%) tanto para a equação de conservação de energia como de massa, considerando mudança de fase e número de Lewis unitário. Essa condição de contorno teve um tratamento matemático de linearização tal como proposto por Mendes et al. (2002).

A Figura 3 apresenta a evolução temporal do conteúdo de umidade a esquerda (na argamassa), $\theta_{P-}(s)$, e a direita (no tijolo), $\theta_{P+}(s)$, contrastando-os com o conteúdo de umidade da interface calculado por um modelo que desconsiderou o fenômeno de descontinuidade entre 2 materiais. Ao desprezá-lo, nota-se uma tendência, em regime permanente, do conteúdo de umidade ponderar-se entre os valores calculados a esquerda e a direita.

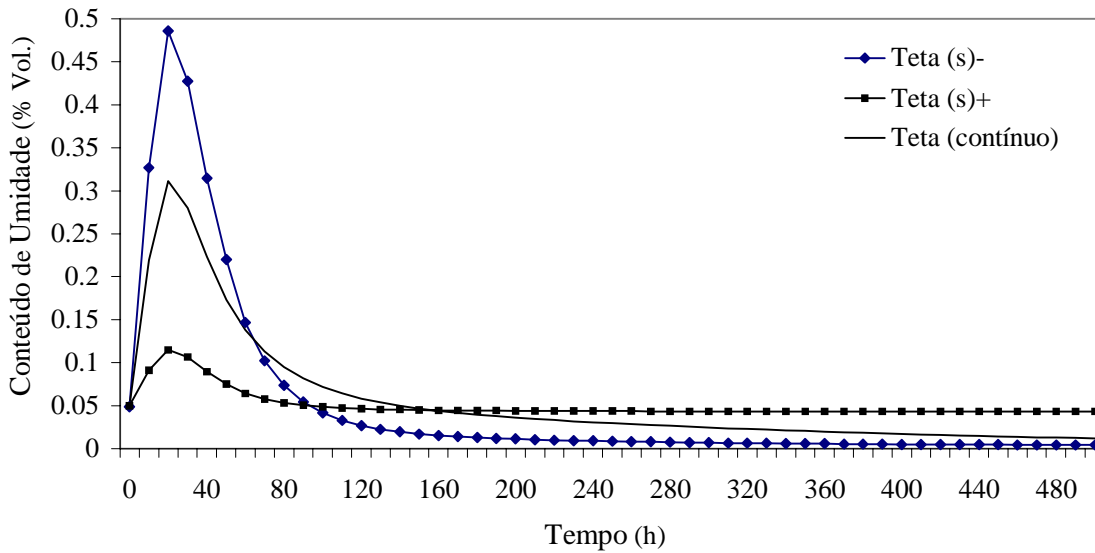


Figura 3. Evolução do conteúdo de umidade na interface argamassa/tijolo.

A Figura 4 mostra o perfil de conteúdo de umidade após decorridas 300h. Neste caso, percebe-se que grandes erros podem ocorrer na determinação de perfil de conteúdo de umidade ao desprezar a descontinuidade.

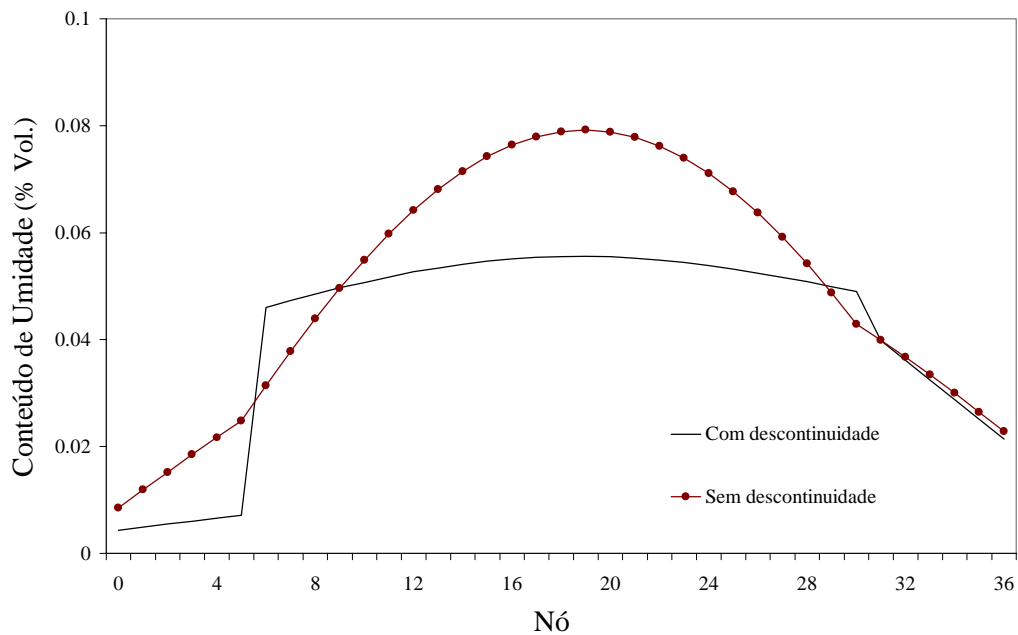


Figura 4. Perfis de conteúdo de umidade para $t=300h$.

Como o conteúdo de umidade é baixo, sua influência nas propriedades termofísicas é pequena, não se identificando, portanto, nenhuma diferença plausível entre os perfis de temperatura calculados pelas duas formas (com e sem descontinuidade do perfil hídrico).

4. Conclusões

Nota-se que a formulação apresentada representa uma contribuição importante para a área de transferência acoplada de calor e umidade através de domínios com mais de um material poroso, podendo ser facilmente aplicada em programas computacionais de transferência acoplada de calor e de umidade tais como UMIDUS (Mendes et al., 1999) e MOIST (Burch, 1993). No caso de edificações – com paredes compostas por 3 camadas: argamassa, tijolo e argamassa -

, notou-se que esta diferença, devido à descontinuidade na interface, pode apresentar mudanças significativas. Esta diferença é tanto maior quanto a diferença entre os potenciais matriciais de cada material.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – e à Fundação Araucária pelo apoio financeiro.

6. Referências

- Burch D.M., 1993, An Analysis of Moisture Accumulation in Walls Subjected to Hot and Humid Climates. ASHRAE Transactions -DE-93-16-4.
- De Freitas V.P., Abrantes V., Crausse P., 1996, Moisture Migration in Building Walls – Analysis of the Interface Phenomena, Building and Environment. 31, No. 2, pp. 99-108.
- IEA (International Energy Agency), 1996, Annex 24 Final Report, Heat, Air, and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts, Vol 1, Task 1: Modelling, Belgium.
- J. R. Philip and D. A. De Vries, 1957, Moisture movement in porous materials under temperature gradients, Transactions of the American Geophysical Union 38, n.2, 222-232.
- Künzel, H.M., 1995, Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and Two-dimensional Calculation Using Simple Parameters, Stuttgart: IRB Verlag.
- Mendes N., Ridley I., Lamberts R., Philippi P.C. and Budag K., 1999, UMIDUS: A PC Program for the Prediction of Heat and Moisture Transfer in Porous Building Elements, Building Simulation Conference – IBPSA 99, p. 277-283, Kyoto.
- Mendes N. e Philippi P.C. 2002, A Computational Algorithm to Solve Highly Coupled Equations of Heat and Mass Transfer, XII International Heat Transfer Conference, Grenoble, France. (*In press*)
- Mendes N., P.C. Philippi and R. Lamberts, 2002, A New Mathematical Method to Solve Highly-Coupled Equations of Heat and Mass Transfer in Porous Media, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 45/3, pp. 509-518.
- Pedersen C.R., 1992, Prediction of Moisture Transfer in Building Constructions. Building Environment 27, N° 3, pp. 387-397.
- Perrin B., 1985, Etude des transferts couplés de chaleur et de masse dans des matériaux poreux consolidés non saturés utilisés en génie civil”, Thèse Docteur d’Etat, Université Paul Sabatier de Toulouse, Toulouse, France.

A MODEL FOR PREDICTING HEAT AND MOISTURE TRANSFER THROUGH THE INTERFACE BETWEEN POROUS MEDIA OF DIFFERENT HYGROSCOPICITY

Nathan Mendes

Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR/CCET), Rua Imaculada Conceição, 1155. Curitiba-PR, 80.215-901
nmendes@ccet.pucpr.br

Paulo C. Philippi

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC-CTC-EMC), Campus Trindade, Florianópolis-SC, 88.040-900
philippi@lmpt.ufsc.br

Abstract. *The Philip and De Vries model, for modeling of heat and moisture transfer through porous media, uses as driving forces the gradients of temperature and moisture content. However, it is well known that there is discontinuity in the moisture content profile at the interface between two porous materials due to their different pore size distribution functions. To avoid this problem, some authors modified the Philip and De Vries model to replace the moisture content gradient as a driving force by either the capillary suction pressure or relative humidity. In this paper, a mathematical formulation is presented so that the moisture content can be used as driving force for moisture transport calculation through the interface between two different porous media. In conclusion, the discontinuity effects on moisture content profiles is discussed.*

Keywords. *Porous Media, Interface Discontinuity, Simulation*