

## ANÁLISE DO PROCESSO ACOPLADO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E UMIDADE EM PAREDES DE EDIFICAÇÕES

Karen G. Peres, Ligia D. F. Marczak  
 Depart. de Engenharia Química - UFRGS  
 Rua Luiz Englert s/nº  
 90040-040 Porto Alegre, RS

Horácio A. Vielmo  
 Depart. de Engenharia Mecânica – UFRGS  
 Rua Sarmento Leite, 425  
 90050-170 Porto Alegre, RS

### RESUMO

*No presente trabalho o desempenho térmico das paredes de uma edificação é simulado considerando-se o efeito combinado do transporte de umidade e de energia no interior da mesma. O modelo clássico de Philip e De Vries é utilizado para descrever o processo simultâneo de transferência de calor e massa em uma parede multicomponente sujeita às condições de contorno de radiação e convecção transientes na face externa e convecção na face interna. Os resultados obtidos para o processo acoplado são comparados com aqueles obtidos a partir de um modelo que leva em conta apenas o efeito do transporte de energia.*

### INTRODUÇÃO

O desempenho térmico das paredes de uma edificação, que apresentam um comportamento não-estacionário, tem participação importante no comportamento térmico dos ambientes internos da mesma, influenciando aspectos como conforto térmico e dimensionamento dos sistemas de climatização. Uma grande parte das pesquisas disponíveis sobre transferência de calor em paredes utiliza apenas a equação da energia para cálculo do balanço térmico através do domínio avaliado. O objetivo do presente trabalho é investigar o processo de transferência de calor em uma parede considerando o efeito simultâneo do transporte de umidade.

Em situações onde apenas o efeito do transporte de energia é considerado, o cálculo do campo térmico sob condições transientes é usualmente obtido através do Método da Função de Transferência (ASHRAE Handbook, 1993). Beyer et al. (1993) e Beyer e Vilhena (1994) propuseram uma outra formulação analítica para a análise deste processo transiente, que, quando comparada aos métodos numéricos, apresenta o atrativo de não necessitar de incrementos sequenciais no tempo e no espaço; a solução desejada, neste caso, pode ser obtida em qualquer instante de tempo. Os resultados desta formulação foram comparados com os obtidos através do Método dos Volumes Finitos levando-se em conta tanto a qualidade da solução quanto a facilidade de uso do método (Beyer et al., 1995).

Em situações onde se leva em conta o efeito da presença e do transporte de umidade para o cálculo do campo térmico, a solução, até o presente momento, somente pode ser obtida através de métodos numéricos devido ao forte acoplamento entre as duas equações governantes (equações da conservação da energia e da massa). Dos trabalhos mais recentes que incorporam esta influência combinada, citam-se os trabalhos de Burch e Thomas (1992) que desenvolveram uma análise unidimensional em uma parede de madeira multicomposta desconsiderando o efeito do calor latente devido à mudança de fase. Karagiozis e Kumaran (1993) analisaram o desempenho de barreiras impermeáveis à passagem do vapor em paredes. Yik et al. (1995) desenvolveram um modelo simplificado para a análise simultânea do processo de troca térmica com transferência de massa com evaporação-condensação em sistemas de ar condicionado. Mendes et al. (1996), através de uma análise numérica, discutem os efeitos de modelos dinâmicos simplificados no processo de transporte de energia. Mais recentemente, Mendes (1997) desenvolveu um código numérico que

permite a avaliação tanto dos coeficientes de transporte como dos modelos de transferência.

O modelo contínuo, discutido por Whitaker (1977) e Bories (1991), associado principalmente a Philip e de Vries (1957) para a análise do transporte simultâneo de calor e massa em meios porosos insaturados, é utilizado no presente trabalho. Neste modelo as equações da conservação da massa e da energia são obtidas utilizando-se as leis fenomenológicas da difusão de massa (Lei de Darcy para a fase líquida e Lei de Fick para a fase vapor) e calor (Lei de Fourier). As equações assim obtidas trazem explicitamente as influências combinadas dos gradientes de temperatura e conteúdo de umidade nos processos de transporte de calor e massa, através de difusividades associadas a estes gradientes.

A parede investigada consiste de camadas de estuque, concreto pesado, isolante e reboco. As propriedades térmicas e difusivas são assumidas constantes e seus valores são aqueles fornecidos por Mendes (1997) e Mendes et al. (1996). Ambos os lados da parede trocam calor por convecção e no lado externo a temperatura ambiente é função do tempo. As equações diferenciais governantes são resolvidas numericamente e de forma iterativa utilizando o método dos volumes finitos. A análise do problema é realizada para as duas situações investigadas: considerando apenas o transporte de energia e considerando também o efeito do transporte de umidade. Os resultados apresentam valores para os fluxos de calor nas fronteiras externa e interna e perfis de temperatura e umidade para vários tempos.

### EQUAÇÕES DE TRANSPORTE E FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A parede de uma edificação é um meio poroso não saturado que contém nos seus espaços vazios ar, água na forma líquida e água na forma vapor. O mecanismo físico de transporte de calor e umidade que ocorre em um meio poroso será sucintamente apresentado a seguir. Tanto o calor como a umidade (na forma líquida ou na forma vapor) são transportados simultaneamente em decorrência da influência combinada de gradientes de temperatura e de conteúdo de umidade. Calor migra essencialmente por condução através das partes sólidas (grãos) e também através dos poros preenchidos com líquido. Nos poros preenchidos com ar, a migração de calor é predominantemente devido ao transporte de calor latente pelo vapor. O transporte de vapor d'água ocorre por

difusão molecular no ar existente nos poros. O líquido, por sua vez, migra pelo efeito de capilaridade (movimento do líquido devido a diferenças de pressão). Os mecanismos responsáveis pelo transporte de líquido e vapor dependem essencialmente da quantidade de água presente no meio.

Para meios onde não existe continuidade na fase líquida, a água presente encontra-se somente absorvida nas paredes dos grãos; este é o chamado estado pendular de um meio poroso. A transferência de umidade dá-se através da migração de vapor, que ocorre por difusão no ar, de regiões onde a sua pressão parcial é mais alta para regiões onde sua pressão parcial é mais baixa. Quando se aumenta a quantidade de água nos poros, começam a existir pequenas pontes ou ilhas de líquido e quando estas pontes unem-se umas às outras passa a existir continuidade na fase líquida, ainda que exista presença de vapor. Neste caso, o líquido é transportado devido ao gradiente do potencial capilar, ou seja, por capilaridade e diz-se que o meio poroso está em estado funicular. Para um aumento adicional do conteúdo de umidade todos os poros estão preenchidos com água, levando a condição de meio poroso saturado. Não existe mais vapor e, neste caso, líquido somente pode ser transportado devido a diferença de pressão hidrostática ou por efeitos de convecção natural.

A seguir será apresentada a obtenção das equações diferenciáveis governantes do fenômeno em estudo, onde as seguintes hipóteses simplificativas são assumidas:

1. A massa de vapor d'água presente nos poros é negligenciável comparada à massa de líquido.
2. O vapor e o ar contidos nos poros comportam-se como gases ideais.
3. Não há influência do efeito de histerese.
4. O efeito da presença de solutos na água é desprezado.
5. O meio poroso é isotrópico.
6. A fase sólida é uma matriz rígida e fixa.

A equação da conservação da energia em um meio poroso não saturado, incluindo o transporte de calor por difusão térmica e o calor transportado pelo líquido e vapor, pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial(CT)}{\partial t} = -\nabla \cdot [-k_* \nabla T + (h_l + h_{lv})j_v + h_l j_l] \quad (1)$$

onde  $T$  é a temperatura,  $j_v$  é o fluxo de vapor,  $j_l$  é o fluxo de líquido e  $C$  é a capacidade calorífica do meio;  $k_*$  é a condutividade térmica para o caso hipotético de não existir fluxo de líquido ou vapor (De Vries, 1975),  $h_l$  é a entalpia do líquido e  $h_{lv}$  é a entalpia de vaporização.

O lado esquerdo da Eq. (1) representa o acúmulo de energia em um volume infinitesimal do meio poroso. O primeiro termo do lado direito representa o calor transportado por condução térmica. O segundo termo indica a energia transportada pelo vapor na forma de calor sensível e latente enquanto que a energia transportada pelo líquido na forma de calor sensível está representada pelo terceiro termo. Conforme discutido anteriormente, a transferência de calor em paredes de edificações é usualmente resolvida considerando-se apenas o transporte de energia por condução através do meio; neste caso, o lado direito da equação acima conteria apenas o primeiro termo.

A Eq. (1) pode ser simplificada considerando que a entalpia de vaporização  $h_{lv}$  é muito maior que a entalpia do líquido e que os fluxos de líquido e vapor tem sentidos opostos. O resultado obtido é a soma dos efeitos de transporte de calor difusivo e transporte de calor latente pelo vapor:

$$\frac{\partial(CT)}{\partial t} = -\nabla \cdot (-k_* \nabla T + h_{lv} j_v) \quad (2)$$

A equação para o transporte de umidade é obtida partindo-se da expressão da conservação da massa que estabelece que:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot \left( \frac{j_v + j_l}{\rho_l} \right) \quad (3)$$

onde  $\rho_l$  é a massa específica do líquido e  $\theta$  é o conteúdo volumétrico de umidade, definido como a razão entre o volume de líquido e o volume total, que inclui o volume de vazios e o volume de grãos do meio poroso.

O lado esquerdo da Eq. (3) representa o acúmulo de umidade em um volume infinitesimal do meio poroso. O fluxo de vapor  $j_v$  é obtido a partir da Lei de Fick para difusão de vapor d'água no ar, modificando-a para incluir os efeitos da dependência da taxa de difusão com a porosidade, conforme é discutido por Philip e De Vries (1957). São incluídas assim variáveis relacionadas à tortuosidade do meio poroso e à redução da seção de passagem do vapor devido a presença do líquido. A expressão final obtida tem a seguinte forma:

$$\frac{j_v}{\rho_l} = -(D_{Tv} \nabla T + D_{\theta v} \nabla \theta) \quad (4)$$

onde  $D_{Tv}$  e  $D_{\theta v}$  são as difusividades do vapor associadas aos gradientes de temperatura e conteúdo de umidade, respectivamente. Vale notar que o fluxo de vapor  $j_v$  está escrito como uma soma de duas componentes, uma devido ao gradiente térmico e outra devido ao gradiente de umidade.

O fluxo de líquido pode ser obtido utilizando-se a Lei de Darcy modificada para ser aplicável a fluxos viscosos em sistemas porosos não saturados, conforme discutido por Childs e Collins-George (1950). A expressão obtida é:

$$\frac{j_l}{\rho_l} = -(D_{Tl} \nabla T + D_{\theta l} \nabla \theta) \quad (5)$$

onde  $D_{Tl}$  e  $D_{\theta l}$  são as difusividades do líquido associadas aos gradientes de temperatura e umidade, respectivamente. Neste caso, também o fluxo de líquido  $j_l$  é escrito como uma soma de duas componentes, uma devido ao gradiente de temperatura e outra decorrente do gradiente de umidade; a incorporação explícita destes efeitos individuais nos fluxos de líquido e vapor constitui a grande contribuição do modelo fenomenológico de Philip e De Vries.

As equações para a conservação da massa e da energia para o problema são obtidas substituindo-se as equações para os fluxos de vapor e líquido, Eqs. (4) e (5), respectivamente, nas Eqs. (2) e (3). O resultado final é:

$$\frac{\partial(CT)}{\partial t} = \nabla \cdot [(k_* + \rho_l h_{lv} D_{Tv}) \nabla T + \rho_l h_{lv} D_{\theta v} \nabla \theta] \quad (6)$$

e,

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot [(D_{\theta l} + D_{\theta v}) \nabla \theta + (D_{Tv} + D_{Tl}) \nabla T] \quad (7)$$

onde  $(k_* + \rho_l h_{lv} D_{Tv})$  é a condutividade térmica do meio poroso incluindo as contribuições da difusão térmica e transporte de energia devido à migração do vapor. Maiores detalhes sobre a obtenção destas equações podem ser obtidos em Damasceno Ferreira (1993).

Uma vez apresentadas as equações governantes do problema, discute-se a seguir a geometria e as condições de contorno do problema em estudo.

A Figura 1 mostra a parede multicompоста de uma edificação onde assume-se contato térmico perfeito entre os meios que constituem a parede. Trata-se de uma parede tipicamente norte americana, cuja utilização teve como objetivo não perder a base de comparação com trabalhos semelhantes já editados (Beyer et al., 1995). Note-se, entretanto, que a aplicação desta formulação a uma parede tipicamente brasileira (reboco-tijolo-reboco) é imediata, bastando apenas modificar as propriedades físicas e difusivas.

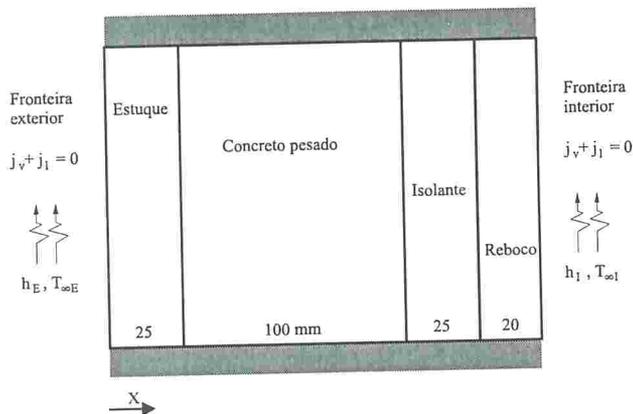


Fig. 1 - Representação esquemática da parede

No início do processo, todo o meio está a uma temperatura constante  $T_i$  e um conteúdo de umidade  $\theta_i$  diferente para cada material que compõe a parede. Ambos os lados da parede trocam calor convectivamente; no lado externo tem-se uma temperatura  $T_\infty$  variável com o tempo simulando a variação de temperatura durante o decurso de um dia completo. Esta temperatura fictícia é denominada Temperatura Sol-Ar (ASHRAE, 1993) e leva em conta o fluxo de calor radioativo incidente do sol variável ao longo do dia. Quando se inclui o transporte de massa, a expressão para o fluxo de calor nas fronteiras deve incluir a parcela referente ao gradiente de conteúdo de umidade. Para o processo de transferência de massa, ambas as fronteiras são assumidas impermeáveis ao fluxo de massa; isto significa que a umidade (na forma de vapor ou líquido) migra no interior da parede de um lado a outro, sem, no entanto, sair do sistema. As expressões analíticas para as duas condições de contorno, térmica e mássica, são, respectivamente:

$$h(T - T_\infty) = -(k_* + \rho_l h_{lv} D_{Tv}) \frac{\partial T}{\partial x} - (\rho_l h_{lv} D_{\theta v}) \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (8)$$

e,

$$-(D_{Tv} + D_{Tl}) \frac{\partial T}{\partial x} - (D_{\theta l} + D_{\theta v}) \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

Conforme será discutido mais adiante, inicialmente o modelo adotado será utilizado para comparar os resultados obtidos com os dados apresentados por Beyer et al. (1995). Neste caso, somente a equação da energia é resolvida. A seguir, os resultados obtidos com as duas equações acopladas serão utilizados para se verificar o efeito da inclusão do processo de transferência de umidade nos perfis de temperatura e nos fluxos de calor.

## METODOLOGIA DE SOLUÇÃO

As equações diferenciais governantes do problema, Eqs. (6) e (7), foram resolvidas numericamente utilizando o método dos volumes finitos (Patankar, 1980). Na discretização do domínio de

solução, mostrado na Fig. 1, foi utilizado uma malha regular com 340 volumes de controle. Para a integração no tempo, utilizando um esquema totalmente implícito com intervalo de tempo de 90 s. A escolha tanto do número de volumes de controle quanto do intervalo de tempo levaram em conta o compromisso entre a precisão da solução numérica e o tempo computacional.

Para a solução do sistema de equações algébricas lineares, resultante da integração das equações diferenciais, foi aplicado o algoritmo TDMA (TriDiagonal-Matrix Algorithm).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a análise dos resultados foram assumidas as considerações listadas a seguir. Os coeficientes convectivos de troca térmica externo e interno são 16,95 e 8,26  $W/m^2.K$ , respectivamente, e a temperatura interna da sala é mantida constante em 24 °C. A temperatura do lado externo evolui em função do tempo ao longo de um dia, segundo a Temperatura Sol-Ar (ASHRAE, 1993) para 40° latitude norte, 21 de julho; os valores desta temperatura são mostrados na Tabela 1. Assume-se que estes valores repetem-se consecutivamente por 8 dias, tempo utilizado nesta análise. A temperatura inicial da parede é constante e igual a 28,5 °C.

Tabela 1 - Temperatura Sol-Ar (°C)

Hora	T Sol-Ar	Hora	T Sol-Ar	Hora	T Sol-Ar
1	25,430	9	29,764	17	50,618
2	24,880	10	31,700	18	43,948
3	24,440	11	33,752	19	31,416
4	24,110	12	35,850	20	29,830
5	24,000	13	40,446	21	28,620
6	25,104	14	46,682	22	27,520
7	26,382	15	50,860	23	26,640
8	27,918	16	52,350	24	25,980

No presente trabalho, todas as propriedades térmicas e difusivas dos materiais que compõe a parede foram assumidas constantes. As propriedades térmicas dos materiais estão mostradas na Tabela 2 e são aquelas utilizadas por Beyer et al. (1995).

Tabela 2 - Propriedades térmicas da parede

Propriedade	Estuque	Concreto	Isolante	Reboco
$k_*$ ( $W/m^2.C$ )	0,692	1,731	0,043	0,727
$\alpha$ ( $m^2/s$ )	$4,434 \times 10^{-7}$	$9,187 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$5,4 \times 10^{-7}$

Os valores das difusividades utilizadas neste trabalho foram determinadas a partir dos valores de difusividades e conteúdos iniciais de umidade apresentadas por Mendes et al. (1996). Estes valores estão mostrados na Tabela 3, onde tem-se que  $D_T = D_{Tv} + D_{Tl}$  e  $D_\theta = D_{\theta v} + D_{\theta l}$ .

Tabela 3 - Difusividades e conteúdos iniciais de umidade

	Estuque	Concreto	Isolante	Reboco
$D_\theta$ ( $m^2/s$ )	$1,75 \times 10^{-9}$	$2,21 \times 10^{-9}$	$3,69 \times 10^{-10}$	$1,75 \times 10^{-9}$
$D_T$ ( $m^2/s.K$ )	$1,16 \times 10^{-11}$	$1,46 \times 10^{-11}$	$1,91 \times 10^{-12}$	$1,16 \times 10^{-11}$
$D_{\theta v}$ ( $m^2/s$ )	$1,75 \times 10^{-9}$	$1,18 \times 10^{-10}$	$3,69 \times 10^{-10}$	$1,75 \times 10^{-9}$
$D_{Tv}$ ( $m^2/s.K$ )	$1,07 \times 10^{-11}$	$1,40 \times 10^{-11}$	$1,78 \times 10^{-12}$	$1,07 \times 10^{-11}$
$\theta_{inicial}$ (%)	1,16	10,8	9,1	1,16

A Fig. 2 apresenta os valores do fluxo de calor na fronteira interna em função do tempo. A linha cheia corresponde à situação onde somente se considera o transporte de energia, enquanto que a linha tracejada corresponde à situação onde os processos de transferência de calor e massa estão acoplados. Estas duas situações são referenciadas na figura como processo térmico e processo acoplado, respectivamente.

O formato das curvas desta figura mostra a característica periódica do processo uma vez que a temperatura  $T_{\infty}$  do lado externo é uma função periódica do tempo ao longo de um dia. Observa-se que o processo evolui para estado estacionário periódico. Com relação à comparação dos dois processos investigados, verifica-se que ocorre um aumento no fluxo de calor quando a transferência de massa é considerada. Isto acontece porque o meio passa a conduzir energia de forma mais efetiva; há agora tanto a contribuição do transporte de calor latente pelo vapor quanto a contribuição do transporte de massa que entra como termo fonte positivo na equação da energia.

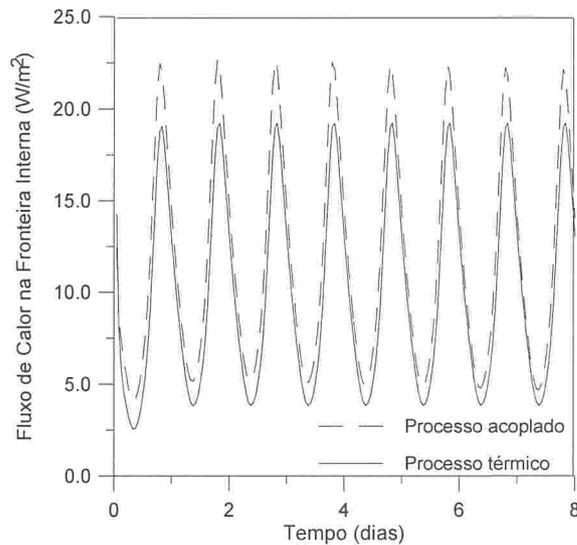


Figura 2 - Fluxo de calor na fronteira interna

A Tabela 4 apresenta uma comparação entre os valores do fluxo de calor na parede interna ao longo do 4º dia de simulação, considerando-se os resultados obtidos a partir do Método da Função de Transferência (Beyer et al., 1995), e dos dois modelos utilizados no presente trabalho: processo apenas térmico e processo acoplado de transferência de calor e massa. No caso dos resultados analíticos obtidos através do Método da Função de Transferência somente o processo térmico é considerado. A análise desta tabela revela a excelente concordância entre os resultados obtidos através deste método analítico e do método numérico, como discutido por Beyer et al. (1995). Conforme já mencionado anteriormente, quando se inclui o processo de transporte de massa o fluxo de calor aumenta e nos picos apresenta diferenças da ordem de 20 %.

A Fig. 3 apresenta os valores do fluxo de calor na fronteira externa em função do tempo. Novamente, a linha cheia corresponde à situação onde somente se considera o transporte de energia, enquanto que a linha tracejada corresponde à situação onde os processos de transferência de calor e massa estão acoplados. Neste caso, o fluxo de calor tem valores negativos porque em determinadas horas do dia a temperatura da parede é maior do que a temperatura  $T_{\infty}$  externa (observe a Tabela 1). Tal fato não ocorre em regiões internas da parede em função da inércia térmica a ela associada (observe os valores sempre positivos da Fig. 2).

Ao longo do período de 8 dias considerado na análise, o fluxo líquido de calor na fronteira externa é próximo ao fluxo de calor na fronteira interna; matematicamente as integrais sob a curva possuem valores próximos. A diferença entre estes valores pode ser utilizada para indicar a proximidade do estado estacionário periódico. Para os 8 dias considerados, a diferença entre os fluxos é da ordem de 8 % e para uma simulação de 20 dias esta diferença cai para 1,5 %.

Tabela. 4 - Fluxo de calor ( $W/m^2$ ) na fronteira interna ao longo do 4º dia

Horas	MFT	Presente trabalho - térmico	Presente trabalho - acoplado
1	11,310	11,440	12,814
2	9,872	9,969	11,238
3	8,556	8,625	9,806
4	7,355	7,401	8,508
5	6,268	6,295	7,342
6	5,304	5,317	6,328
7	4,533	4,533	5,566
8	4,038	4,027	5,141
9	3,843	3,831	5,070
10	3,957	3,947	5,346
11	4,373	4,366	5,950
12	5,069	5,068	6,857
13	6,027	6,031	8,042
14	7,354	7,345	9,683
15	9,272	9,280	12,110
16	11,778	11,831	15,169
17	14,540	14,638	18,341
18	17,071	17,225	21,046
19	18,772	18,983	22,545
20	18,968	19,231	22,101
21	17,839	18,121	20,348
22	16,225	16,486	18,321
23	14,524	14,741	16,328
24	12,868	13,039	14,450

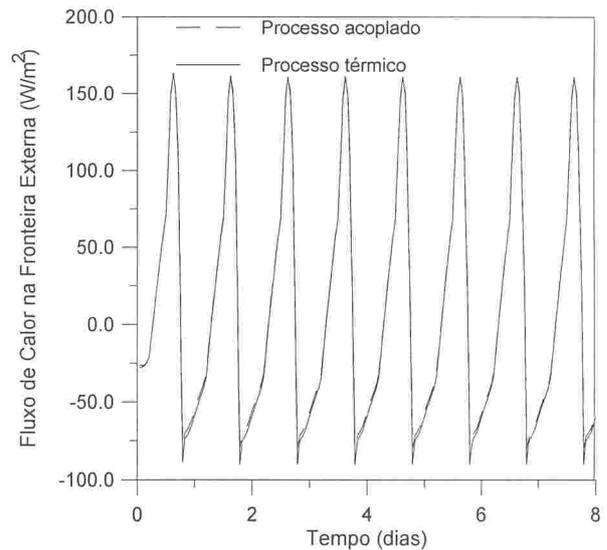


Fig. 3 - Fluxos de calor na fronteira externa

Com relação à comparação entre as curvas, observa-se que elas são praticamente coincidentes, indicando que a inclusão do

transporte de massa tem pouca influência no cálculo deste fluxo de calor. Com efeito, a temperatura nesta fronteira é pouco influenciada pela parcela referente ao transporte de massa cuja importância cresce à medida que se avança no meio. Isto deve-se principalmente à condição de contorno de impermeabilidade mássica aplicada nesta face.

A Fig. 4 apresenta a distribuição de temperatura ao longo da parede para o 8º dia de simulação tendo como parâmetro de curva quatro diferentes horas do dia: hora 0, 6, 12 e 18. As linhas cheias representam a situação do problema térmico e as linhas tracejadas representam o processo acoplado.

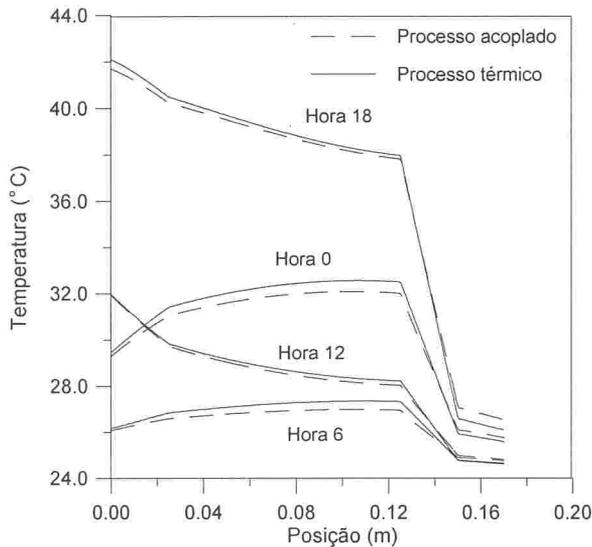


Fig. 4 - Distribuição de temperatura para o 8º dia

Conforme pode ser observado no formato das curvas desta figura, ao longo do dia as temperaturas mínimas são atingidas na hora 6 e as máximas na hora 18, refletindo o comportamento da condição de temperatura externa variável. Nos horários onde a Temperatura Sol-Ar é menor, ou seja, à noite, tem-se menores valores de temperatura no perfil térmico da parede e onde a Temperatura Sol-Ar é mais elevada, durante o dia, tem-se um aumento nos valores do perfil de temperatura no interior da parede até a hora 18, onde atinge os valores máximos. Além disto, pode-se observar as diferenças nos valores das propriedades difusivas dos materiais que compõem a parede, indicadas pelas diferentes inclinações dos perfis. Estas diferenças ficam evidenciadas especialmente nas interfaces entre dois materiais, causando os pontos de inflexão verificados na figura. Vale notar as declividades positivas nas horas 0 e 6 que causam valores de fluxos térmicos negativos ao longo deste período. Outra característica que pode ser observada é que na região junto à parede externa os perfis têm valores que se aproximam da temperatura  $T_{\infty}$  - variável com o tempo; próxima à parede interna os perfis tendem a um valor único, uma vez que a temperatura interna é assumida constante.

Com relação à comparação dos perfis de temperatura obtidos para os dois modelos, verifica-se que a inclusão do transporte de umidade na formulação não modificou o padrão das distribuições de temperatura. O que ocorre é apenas uma mudança branda nos seus valores em função do meio considerado.

A Fig. 5 apresenta a distribuição do conteúdo de umidade no interior da parede para o 8º dia de simulação para quatro diferentes horas do dia. Observa-se que há pouca variação entre as distribuições de  $\theta$  para as diferentes horas do dia, indicando que esta variável possui uma resposta mais lenta ao tempo quando comparada às distribuições de temperatura. Isto deve-se em parte

ao fato de que a camada de isolante atua como uma barreira de umidade; observe na Tabela 3 que o valor da sua difusividade mássica é menor do que as demais. Suspeita-se que a inclusão da variação das propriedades difusivas com o conteúdo de umidade altere significativamente o formato destas curvas. Uma análise levando em conta esta variação será realizada na continuação deste trabalho.

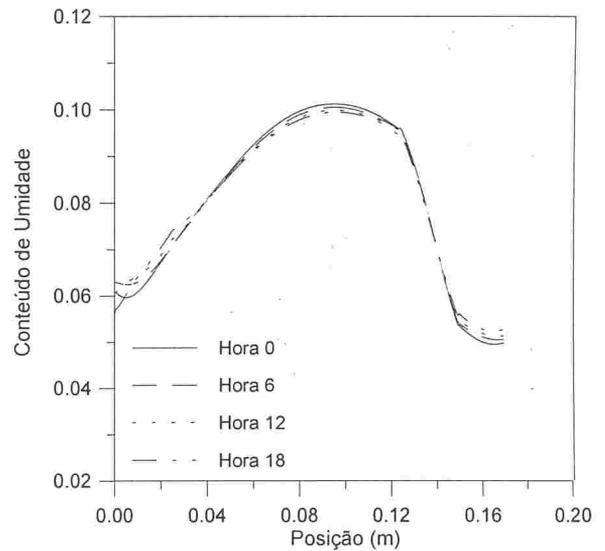


Fig. 5 - Distribuição de conteúdo de umidade para o 8º dia

A fim de se verificar a sensibilidade dos resultados térmicos com a variação das propriedades difusivas do meio, realizou-se algumas simulações nas quais os valores das difusividades foram alterados individualmente 15 e 30 %, para mais e para menos. O objetivo deste estudo foi avaliar quantitativamente como o fluxo de calor junto à superfície interna é afetado pela variação destas propriedades. Para a análise dos resultados foram computados os erros associados ao ponto de pico da curva de fluxo térmico (observe a Fig. 2). Os valores obtidos demonstraram que os maiores erros (da ordem de 10 %) ocorreram no início do processo - quando os gradientes, térmico e mássico, são maiores - e para a simulação em que se alterou em 30 % o coeficiente  $D_{\theta v}$ . Esta análise de variação de propriedades teve como objetivo verificar, de uma maneira bastante aproximada, como o processo em estudo se comporta face às modificações das propriedades difusivas. Uma análise mais rigorosa, envolvendo a variação completa de todas estas propriedades com o conteúdo de umidade, deve ser realizada a fim de se obter resultados mais conclusivos.

## CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou o fenômeno do transporte simultâneo de calor e massa no interior da parede de uma edificação. O desempenho térmico destas paredes tem forte influência sobre o comportamento térmico dos ambientes internos da mesma, refletido em aspectos como conforto térmico e dimensionamento dos sistemas de climatização. Usualmente, somente o efeito da transferência de energia é considerado. Neste estudo, analisou-se o fenômeno através do processo acoplado de transferência de energia e umidade a fim de se investigar os efeitos da inclusão deste último no processo térmico.

A análise realizada utilizou o modelo clássico de Philip e de Vries (1957) para descrever o fenômeno do transporte simultâneo de calor e umidade em meios porosos insaturados. Neste modelo,

as leis fenomenológicas de Fick, Darcy e Fourier são utilizadas nas equações de conservação de massa e energia e as equações resultantes trazem explicitamente as influências combinadas dos gradientes de temperatura e conteúdo de umidade em ambos os processos de transferência.

A parede multicompоста investigada estava sujeita a condições de contorno convectiva em ambos os lados, sendo que na face externa a temperatura  $T_{\infty}$  foi tomada variável com o tempo. Para o problema mássico assumiu-se que as duas faces eram impermeáveis ao fluxo de massa. As propriedades térmicas e difusivas dos materiais que compõem a parede foram assumidas constantes. As equações diferenciais governantes do problema, equações da conservação da energia e da massa, foram resolvidas numericamente utilizando o Método dos Volumes Finitos com integração temporal totalmente implícita.

Os resultados para o fluxo de calor na fronteira interna revelaram a natureza periódica do fenômeno e mostraram que ocorre um aumento nos valores do fluxo quando o processo de transporte de massa está acoplado ao térmico. Este aumento foi da ordem de 20 % e é consequência da inclusão das contribuições do transporte de calor latente pelo vapor e do transporte de massa decorrente do gradiente de umidade no transporte de energia. Para os valores do fluxo de calor junto à superfície externa, a inclusão do transporte de massa teve pouca influência nos resultados em decorrência da condição de impermeabilidade à passagem de umidade.

Nas curvas de distribuição de temperatura ficou evidenciado a variação dos perfis em função da temperatura  $T_{\infty}$  externa variável com o tempo. A comparação dos resultados para os dois modelos utilizados neste trabalho mostrou que a inclusão do transporte de umidade não modificou o padrão dos perfis de temperatura, apenas alterando os valores brandamente. Para as distribuições de conteúdo de umidade obteve-se pouca variação para as diferentes horas do dia, indicando que esta variável possui uma resposta mais lenta ao tempo quando comparada às distribuições de temperatura. Uma análise mais rigorosa, envolvendo a variação das propriedades difusivas com o conteúdo de umidade, deverá ser feita para se ter resultados mais conclusivos com respeito às distribuições de umidade.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES e da FAPERGS - Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul - para a realização deste trabalho.

#### REFERÊNCIAS

- ASHRAE, 1993, "Handbook of Fundamentals", *ASHRAE*, pp.26.17-26.28.
- Beyer, P.O., 1996, "Fluxo de Calor não Estacionário em Meios Multicompostos", *VI Encontro Nacional de Ciências Térmicas*, Florianópolis, Santa Catarina, pp. 817-822.
- Beyer, P.O., Vielmo, H.A. e Vilhena, M.T.M.B., 1995, "Estudo Comparativo entre Soluções para a Transferência de Calor em Paredes Multicompostas", *XIII Congresso Brasileiro e II Ibero Americano de Engenharia Mecânica*, Belo Horizonte, MG, CD-ROM.
- Beyer, P.O. e Vilhena, M.T.M.B. e Streck, E.I., 1993, "Fluxo de Calor Transiente em Paredes pela Transformada de Laplace com Inversão Numérica", *XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, Brasília, pp. 609-612.
- Beyer, P.O. e Vilhena, M.T.M.B., 1994, "Fluxo de Calor Transiente em Paredes Externas Multicompostas", *V Encontro Nacional de Ciências Térmicas*, São Paulo.

Bories, S., 1991, "Fundamentals of Drying of Capillary-Porous Bodies in Convective Heat and Mass Transfer in Porous Media", S. Kakaç et al (eds) Kluvic academic publishers, pp. 391-434.

Burch, D.M., Thomas, W.C., 1992, "An Analysis of Moisture Accumulation in a Wood-frame Wall Subject to Winter Climate", *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings V, Proceedings of ASHRAE/DOE/BTECC/CIBSE Conference*, Flórida.

Childs, E.C. e Collis-George, N., 1950, "The Permeability of Porous Materials", *Proc. roy. soc.*, vol. 201 a, pp. 392-405.

De Vries, D.A., 1975, "Heat Transfer in Soils", *Heat and Mass Transfer in Biosphere*, Scripta, Washington, pp. 5-28.

Damasceno Ferreira, L. S., 1993, "Transferência de Calor e Migração de Umidade em Solos que Envolvem Cabos de Potência Aterrados", Tese de Doutorado, UFSC.

Karagiozis, A. N. e Kumaran, M. K., 1993, "Computer Model Calculations on the Performance of Vapor Barriers in Canadian Residential Buildings", *ASHRAE Transactions*, vol. 99, part 2.

Mendes, N., 1997, "Desenvolvimento de Modelos para Código Genérico de Previsão da Transferência de Calor e de Umidade em Elementos Porosos de Edificações", Tese de Doutorado, UFSC.

Mendes, N., Winkelmann, F. C., Lamberts, R., Philippi, P. C., Cunha Neto, J.A.B. e Pedrini, A., 1996, "Cooling Loads from Heat and Moisture Transfer through Porous Walls: Sensitivity to Treatment of Transfer Coefficients in the Philip and De Vries Model", *VI Encontro Nacional de Ciências Térmicas*, Florianópolis, Santa Catarina, pp. 155-160.

Patankar, S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, Washington.

Philip, J.R. e De Vries, D.A., 1957, "Water Movement in Porous Media under Temperature Gradients", *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 29, pp. 222-232.

Whitaker, S., 1977, "Simultaneous Heat Mass and Momentum Transfer in Porous Media", *Drying Technology*, vol. 1, pp. 3-33.

Yik, F. W. H., Underwood, C. P. and Chow, W. K., 1995, "Simultaneous Modelling of Heat and Moisture Transfer and Air-Conditioning Systems in Buildings", *Proc. IBPSA Building Simulation '95, 4th International Conference*, Madison, WI, USA.

#### ABSTRACT

In the present work, the thermal performance of a building wall is simulated considering the combined effects of moisture and energy transport through the wall. The classical model by Philip and De Vries is used to describe the simultaneous process of heat and mass transfer in a composite wall with a transient convective boundary condition. The results for the coupled process are compared with those obtained by using a model that takes in to account only the effect of the energy transport.