

## **DETERMINAÇÃO DE PERFIS DE TEMPERATURA E UMIDADE PARA O SOLO TIPO ALUVIÃO-ARENOSO PARA AS CIDADES DE BELÉM E BRASÍLIA**

**Gerson H. dos Santos (1); Nathan Mendes (2); Roberto Z. Freire (3)**

Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR/ CCET

Laboratório de Sistemas Térmicos

Rua Imaculada Conceição, 1155, Curitiba-Pr, 80215-901,

Tel: 041-330-1691

(1) [ghsantos@ccet.pucpr.br](mailto:ghsantos@ccet.pucpr.br); (2) [nmendes@ccet.pucpr.br](mailto:nmendes@ccet.pucpr.br); (3) [rozafre@terra.com.br](mailto:rozafre@terra.com.br)

### **RESUMO**

Programas para a simulação de edificações normalmente não levam em conta os efeitos da umidade na determinação da temperatura do solo. Entretanto, a presença de umidade pode fortemente afetar a distribuição de temperatura nos solos especialmente aos mecanismos de evaporação/condensação e a forte variação de suas propriedades termofísicas.

Para calcular os perfis de temperatura de um maneira mais exata, desenvolveu-se o software Solum, no qual foi modelada a transferência de calor acoplada com umidade em solos. A metodologia apresentada é baseada na teoria de Philip e De Vries, usando as propriedades termofísicas para o solo do tipo aluvião-arenoso. As equações governantes foram discretizadas em volumes finitos e um modelo 3-D foi usado para descrever o fenômeno físico da transferência de calor e massa em um solo poroso. Utilizou-se o algoritmo MultiTridiagonal-Matrix Algorithm (MTDMA) para resolver as equações governantes fortemente acopladas.

Na seção de resultados, mostram-se os perfis de temperatura e umidade para o solo do tipo aluvião-arenoso para as cidades de Belém (clima quente e úmido) e Brasília (clima quente e seco).

### **ABSTRACT**

Building simulation programs normally do not take into account moisture effects in soils temperature determination. However, the presence of humidity can strongly affect the temperature distribution in soils due especially to the evaporation/condensation mechanisms and the strong variation of their thermophysical properties.

In order to calculate the temperature profiles in a more accurate way, we have developed the software Solum, which was conceived to model the coupled heat and moisture transfer in soils. The presented methodology is based on the theory of Philip and De Vries, using the thermophysical properties for three types of soil chemical composition. The governing equations were discretized using the finite volume method and a 3-D model was used for describing physical phenomena of heat and mass transfer in porous soils. The robust MultiTridiagonal-Matrix Algorithm (MTDMA) was used to solve the strongly-coupled problem.

In conclusion, we show temperature and moisture content profiles for a silt sandy soil in the cities of Belém (hot and humid climate) and Brasília (hot and dry climate).

## 1. INTRODUÇÃO

Através de dados da Secretaria de Energia do Estado de São Paulo, estima-se que o consumo de energia elétrica nas edificações brasileiras representa mais de um terço do total nacional. O emprego de padrões arquitetônicos adequados, a especificação de produtos e materiais energeticamente eficientes e a adequação de critérios e projetos racionais podem reduzir em até 60% o consumo energético das edificações, ([www.energia.sp.gov.br](http://www.energia.sp.gov.br)).

Como este problema atinge praticamente o mundo todo, foram desenvolvidos vários programas computacionais – destacando-se os códigos BLAST (1977), DOE-1 (1978), NBSLD (1974), TRNSYS (1975), DOMUS (2001) – para simular o comportamento termoenergético de edificações. No entanto, estes códigos apresentam várias simplificações no que diz respeito a transferência de calor através do piso e do solo nas edificações.

Entre os problemas no cálculo do fluxo de calor através do solo, pode-se destacar: o seu fenômeno multidimensional; o seu regime transiente, no que diz respeito ao transporte de calor e massa; e o grande número de parâmetros envolvidos, principalmente quando considera-se o transporte de calor acoplado com a umidade.

Davies et al. (1995) usando o método dos volumes finitos, compararam modelos multi-dimensionais e observaram que a simulação através de um modelo tridimensional fornece melhores resultados do que um modelo bidimensional, quando valores de temperatura do ambiente e fluxo de calor foram comparados experimentalmente. Zoras (2001) utiliza-se uma combinação de fatores de resposta estrutural para a solução numérica tri-dimensional da equação da condução de calor.

Nos trabalhos citados acima, a condutividade e a capacidade térmica são consideradas constantes e os efeitos da umidade são ignorados.

A presença de umidade no solo fornece um mecanismo adicional de transporte: nos poros de um solo insaturado, água líquida evapora no lado mais aquecido, absorvendo calor latente de vaporização, enquanto, devido ao gradiente de pressão do vapor, vapor condensa no lado mais frio do poro, liberando calor latente de vaporização (Deru e Kirkpatrick, 2002).

Freitas e Prata (1996) elaboraram uma metodologia numérica para análise térmica de cabos de potência enterrados em solos na presença de migração de calor e umidade em suas vizinhanças. Neste trabalho as equações governantes foram resolvidas via volumes finitos em duas dimensões.

Onmura et al. (2001) investigaram o efeito evaporativo de telhados cobertos com grama em ambientes e observaram uma redução de até 50 % no fluxo de calor através do teto.

Devido a instabilidade numérica ocasionada pelo efeito do calor latente, quando se utilizam grandes passos de tempo, Wang e Hagentoft (2001) propuseram um método numérico baseado em um algoritmo que combina um modelo explícito com um esquema de relaxação. Neste modelo, o cálculo do passo de tempo é feito através de um critério de estabilidade para o transporte de calor e umidade, e de um critério para controlar o calor latente liberado ou absorvido.

Defrontando-se com o mesmo problema, Mendes et al. (2002) propuseram o MTDMA para resolver as equações do balanço de massa e energia discretizadas em volumes finitos. Este modelo apresentou-se robusto para a solução implícita simultânea do balanço de massa e energia em meios porosos.

Neste trabalho, descreve-se o um modelo para calcular a transferência acoplada de calor e de umidade em solos, baseada na teoria de Philip e De Vries (1957). Utilizaram-se as propriedades termofísicas para o solo do tipo aluvião-arenoso (Oliveira e Freitas, 1993). Na seção de resultados, mostram-se os perfis de temperatura e umidade para o solo nas cidades de Belém (clima quente e úmido) e Brasília (clima quente e seco).

## 2. MODELO MATEMÁTICO

As equações diferenciais parciais governantes para modelar a transferência de calor e umidade em meios porosos são dadas pelas Eqs. (1) e (2). Elas foram derivadas da conservação da massa e da energia em um elemento de volume de um material poroso. A equação da conservação da energia é descrita como:

$$\rho_0 c_m (T, \theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda (T, \theta) \nabla T) - L(T) (\nabla \cdot \mathbf{j}_v) \quad (1)$$

enquanto que a equação da conservação da massa como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot \left( \frac{\mathbf{j}}{\rho_l} \right) \quad (2)$$

onde  $\rho$  é a densidade da matriz sólida,  $c_m$ , calor específico médio,  $T$ , temperatura,  $t$ , tempo,  $\lambda$ , condutividade térmica,  $L$ , calor latente de vaporização, ( $= h_{LV}$ ),  $\theta$  conteúdo de umidade em base de volume,  $\mathbf{j}_v$ , fluxo de vapor,  $\mathbf{j}$ , fluxo total de massa e  $\rho_l$  a densidade da água.

Nota-se que a Eq. (1) difere da equação de Fourier para o fluxo de calor transiente devido ao termo fonte responsável pela mudança de fase dentro do meio poroso. De acordo com Philip e De Vries (1957) e assumindo a hipótese de que o solo é um meio isotrópico, o fluxo total de umidade é dado por

$$\begin{aligned} \frac{\mathbf{j}}{\rho_l} = & - \left( D_T (T, \theta) \frac{\partial T}{\partial x} + D_\theta (T, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \mathbf{i} - \left( D_T (T, \theta) \frac{\partial T}{\partial y} + D_\theta (T, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \mathbf{j} \\ & - \left( D_T (T, \theta) \frac{\partial T}{\partial z} + D_\theta (T, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{\partial K_g}{\partial z} \right) \mathbf{k} \end{aligned} \quad (3)$$

onde

$D_T = D_{Tl} + D_{Tv}$  e  $D_\theta = D_{\theta l} + D_{\theta v}$ , onde  $D_{Tl}$  é o coeficiente de transporte na fase líquida associado ao gradiente de temperatura,  $D_{Tv}$ , é o coeficiente de transporte na fase vapor associado ao gradiente de temperatura,  $D_{\theta v}$ , é o coeficiente de transporte na fase vapor associado ao gradiente de conteúdo de umidade,  $D_T$ , coeficiente de transporte de massa associado ao gradiente de temperatura ( $m^2 / s \text{ } ^\circ\text{K}$ ),  $D_\theta$ , coeficiente de transporte de massa associado ao gradiente de conteúdo de umidade ( $m^2 / s$ ) e  $K_g$ , a condutividade hidráulica (m/s).

Como condição de contorno para a superfície, na equação associada à conservação de energia, considera-se que o solo é exposto a radiação de onda curta, convecção de calor e de massa e mudança de fase. Então, o balanço de energia torna-se:

$$- \left( \lambda (T, \theta) \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=H} - (L(T) j_v)_{y=H} = h (T_\infty - T_{y=H}) + \alpha q_r + L(T) h_m (\rho_{v,\infty} - \rho_{v,y=H}) - \varepsilon R_{ol} \quad (4)$$

onde  $h (T_\infty - T_{y=H})$  representa o calor trocado com o ar exterior por convecção,  $\alpha q_r$  é a radiação absorvida por onda curta,  $R_{ol}$  representa a perda por radiação de onda longa e  $h_m L(T) (\rho_{v,\infty} - \rho_{v,y=H})$ , é a energia proveniente da mudança de fase. A absorvidade solar é definida como  $\alpha$  e o coeficiente de convecção de massa como  $h_m$  que é relacionado com o  $h$  através da relação de Lewis.

O balanço de massa para o solo (externo) é descrito como

$$-\frac{\partial}{\partial y} \left( D_{\theta}(T, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} + D_T(T, \theta) \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=H} = \frac{h_m}{\rho_l} (\rho_{v,\infty} - \rho_{y=H}) \quad (5)$$

As outras superfícies foram consideradas adiabáticas e impermeáveis.

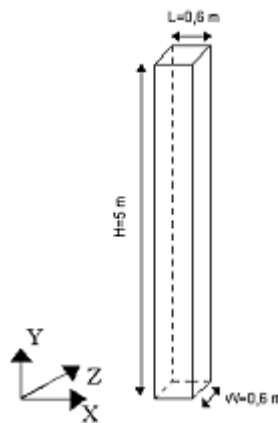
As equações 6 e 7 mostram a diferença de concentração de vapor,  $\Delta\rho_v$ , no lado direito da equação. Esta diferença é entre a superfície porosa e o ar e é normalmente determinada com valores de iterações anteriores de temperatura e conteúdo de umidade, resultando em um termo de instabilidade adicional.

Mendes et al. (2002) apresentaram um novo procedimento para calcular o fluxo de vapor, independentemente dos valores da temperatura e de conteúdo de umidade, das iterações anteriores. Para isto, linearizou-se o termo  $\Delta\rho_v$  como uma combinação linear da temperatura e do conteúdo de umidade.

### 3. PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO

As equações governantes foram resolvidas usando a metodologia de volumes finitos (Patankar, 1980). Utilizou-se coordenadas Cartesianas para a geometria do problema. As equações diferenciais foram integradas em cada volume de controle e um esquema totalmente implícito foi adotada para a derivada temporal. Resolveram-se as equações que descrevem o fenômeno físico através do MTDMA (MultiTridiagonal-Matrix Algorithm) descrito por Mendes *et al.* (2002). Neste algoritmo, as variáveis dependentes são obtidas simultaneamente, evitando divergências numéricas causadas pelo uso de termos calculados em iterações anteriores.

Neste estudo, considerou-se o solo do tipo aluvião-arenoso com suas propriedades extraídas de Oliveira e Freitas (1993). Para o domínio, consideraram-se as dimensões da Fig. 1. Na profundidade, utilizou-se uma dimensão de 5 m, conforme encontrado em Santos (2003). Como há simetria nos gradientes de temperatura e umidade na direção de X e Z, considerou-se 0,6 m para as outras dimensões. Distribuiu-se o domínio em 234 nós (3 x 26 x 3), e adotou-se para as condições iniciais uma temperatura de 20 °C e um conteúdo de umidade de 4,4 % em volume.

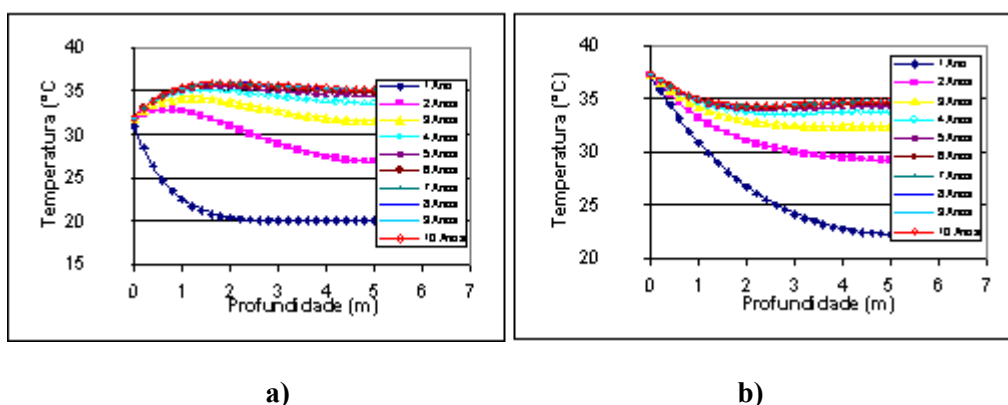


**Figura 1: Dimensões do domínio.**

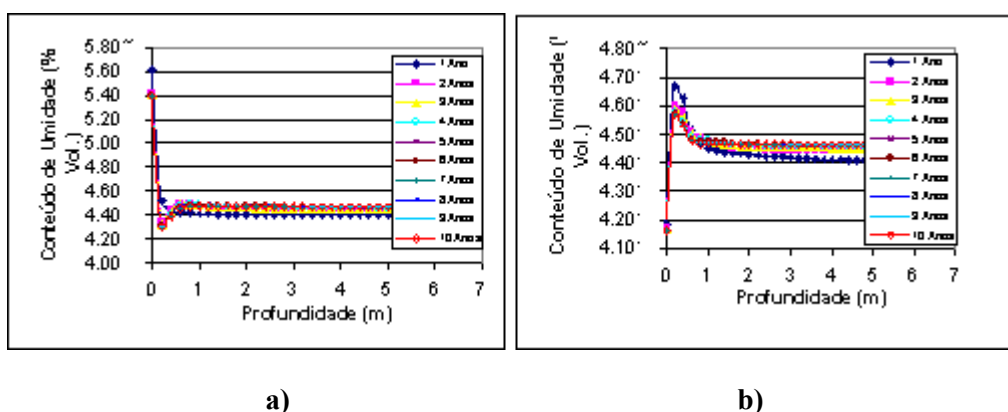
Para a condição de contorno, submeteu-se a superfície superior do domínio aos arquivos climáticos das cidades de Belém e Brasília (Mendes *et al.*, 1999) e considerou-se um coeficiente de convecção constante de 10 W/m<sup>2</sup> K (Santos, 2003), uma absorvidade de onda curta de 0,5 e uma perda constante por radiação de onda longa de 30 W/m<sup>2</sup> (Santos, 2003). As outras superfícies foram consideradas adiabáticas e impermeáveis.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Fig. 2 observam-se os perfis de temperatura média do solo para o mês de janeiro na cidade de Belém. Verifica-se na superfície do solo, uma temperatura média praticamente constante com a evolução do tempo. A partir de 4 anos de simulação, observam-se que os perfis de temperatura ao longo do domínio, tornam-se praticamente constantes. Comparando as temperaturas médias na superfície do solo, notam-se maiores valores para o mês de julho, sendo atribuídos a temperatura média superior para Belém obtidas durante este período e aos efeitos de radiação. As altas temperaturas verificadas para o solo, devem-se principalmente aos efeitos da radiação solar, fornecido pelo arquivo climático.



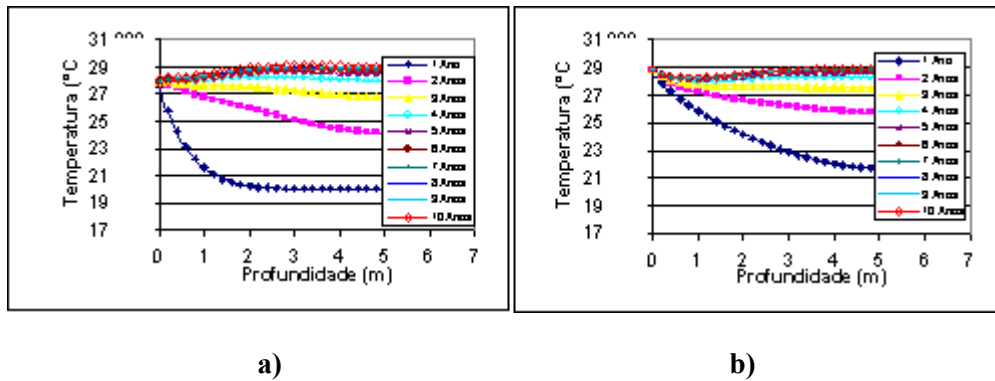
**Figura 2: a) Perfis da temperatura média do solo para o mês de janeiro da cidade de Belém durante 10 anos. b) Perfis da temperatura média do solo para o mês de julho da cidade de Belém durante 10 anos.**



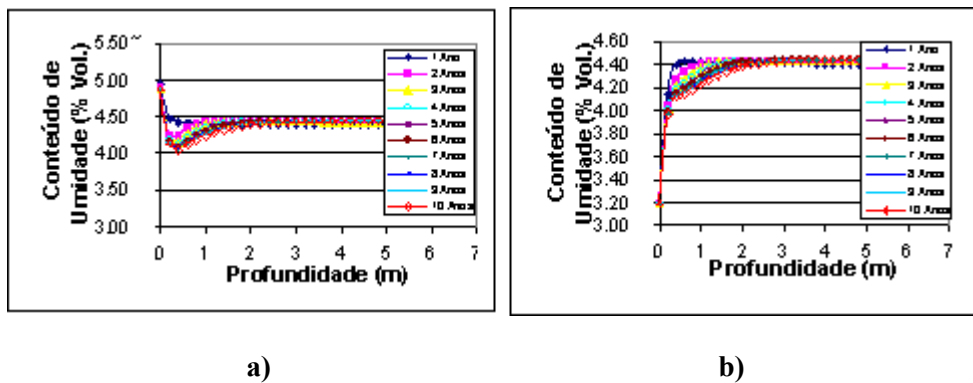
**Figura 3: a) Perfis do conteúdo de umidade médio do solo para o mês de janeiro da cidade de Belém durante 10 anos. b) Perfis do conteúdo de umidade médio do solo para o mês de julho da cidade de Belém durante 10 anos.**

Na Fig. 3, observa-se que a partir de 0,7 m de profundidade, os perfis de conteúdo de umidade tornam-se praticamente constantes com a evolução do tempo. No arquivo climático, observa-se um valor de umidade relativa média maior para o mês de janeiro (89 %) em comparação com o mês de julho (81 %) para a cidade de Belém. Deste modo, verificam-se valores de conteúdo de umidade na superfície do solo maiores para o mês de janeiro, devendo-se aos efeitos de condensação.

Devido a uma temperatura média menor quando comparada com Belém, na cidade de Brasília observam-se perfis de temperatura com valores menores. Apesar de Brasília possuir uma temperatura média menor para o mês de julho, o arquivo climático fornece valores superiores para a radiação total para o mesmo período. Neste caso, nota-se na Fig. 4 uma temperatura média maior para a superfície do solo durante o mês de julho.



**Figura 4: a) Perfis da temperatura média do solo para o mês de janeiro da cidade de Brasília durante 10 anos. b) Perfis da temperatura média do solo para o mês de julho da cidade de Brasília durante 10 anos.**



**Figura 5: a) Perfis do conteúdo de umidade médio do solo para o mês de janeiro da cidade de Brasília durante 10 anos. b) Perfis do conteúdo de umidade médio do solo para o mês de julho da cidade de Brasília durante 10 anos.**

Em Brasília obtém-se uma umidade relativa média superior para o mês de janeiro (82 %), comparando-a com julho (59 %). Deste modo, verifica-se durante o mês de janeiro (Fig. 5) um conteúdo de umidade maior para o solo neste período, devido a efeitos de condensação.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresentou-se um modelo matemático para analisar a transferência acoplada de calor e umidade em solos. Utilizou-se o MTDMA (MultiTridiagonal-Matrix Algorithm) para resolver as equações governantes para a transferência de calor e massa em meios porosos. Este método resolve simultaneamente as equações governantes, evitando instabilidades numéricas. Deste modo, permite-se a utilização de grandes passos de tempo para a simulação do transporte tridimensional de calor e massa em solos, com coeficientes de transporte altamente dependentes do conteúdo de umidade.

Na seção de resultados, apresentaram-se os perfis de temperatura e conteúdo de umidade para as cidades de Belém (quente e úmido) e Brasília (quente e seco). Observaram-se nos gráficos, a maior importância da difusão de calor do que a de massa para o solo.

Para trabalhos futuros, será analisada a influência da transferência de calor e umidade do solo na performance térmica de edificações.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DAVIES, M., TINDALE, A., LITTER, J.(1995). Importance of Multi-Dimensional Conductive Heat Flow In and Around Buildings. *Building Serv Eng Res Technol*, V. 16, N° 2, p.83-90.
- DERU, M. P., KIRKPATRICK, A.T. (2002). Ground-Coupled Heat and Moisture transfer from building –Part 1 – Analysis and Modeling. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol.124, p. 10-16.
- FREITAS, D. S., PRATA, A.T. (1996). Thermal Performance of Underground Power Cables with Constant and Cyclic Currents in Presence of Misture Migration in the Surrounding Soil. *IEEE Transactions on Power Delivery*, V. 11, N° 3.
- MENDES, N., PHILLIP, P. C., LAMBERTS, R. (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*, V. 45, p. 509-518.
- 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, Japan.
- OLIVEIRA, A. A. J., FREITAS, D. S. (1993). Influência do Meio nas Difusividades do Modelo de Phillip e Vries. *Relatório de Pesquisa, UFSC*.
- ONMURA, S., MATSUMOTO, M., HOKOI, S. (2001). Study on Evaporative Cooling Effect of Roof Lawn Gardens. *Energy and Building*, Vol. 33, p. 653-666.
- PATANKAR, S.V.(1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*.
- PHILIP, J. R., DE VRIES, D. A.(1957). Moisture Moviment in Porous media under Temperature Gradients. *Trans Am geophysical Union*, V. 38, P. 222-232.
- SANTOS, G. H. (2003). *Transferência Tridimensional Acoplada de Calor e de Umidade em Solos Sob Edificações*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação e Engenharia Mecânica Pontificia Universidade Católica do Paraná – PUCPR.
- WANG, J., HAGENTOFT, C. E. (2001). A Numerical Method for Calculating Combined Heat, Air and Moisture Transport in Building Envelope Components. *Nordic Journal of building Physics*, Vol. 2.
- ZORAS, S., DAVIES, M., WROBEL, L. C., (2001). Earth-Contact Heat Transfer: A Novel Simulation Technique. *7th REHVA World Congress – CLIMA 2000*, Napoli.