

## Análise do desempenho de solos insaturados como trocadores de calor em sistemas de climatização.

### Performance analysis of unsaturated soils as heat exchanger in climatization systems.

#### RESUMO

Com o crescente aumento do consumo de energia no mundo, tecnologias estão sendo desenvolvidas visando economizar e reduzir o custo de produção da mesma. Cerca um terço de toda energia consumida é utilizada em sistemas de climatização (aquecimento ou resfriamento) de ambientes. No sistema proposto, o solo é utilizado como trocador de calor pela sua alta inércia térmica, sendo que o ar troca calor com o solo para que chegue até o ambiente fechado em temperatura confortável. Buscando resolver as equações da energia e transferência de massa acopladas, foi estudada a implementação da equação governante de transferência de massa no software comercial *Ansys Fluent*. Para estudar a situação real, foi desenvolvida a equação para ser interpretada como a temperatura e transferência de calor na superfície superior do volume. Essas equações foram utilizadas como as condições de contorno para o problema proposto. Os resultados mostraram que as simplificações feitas para implementação da equação geraram um erro grande a ponto de ser necessário que a equação seja melhor trabalhada acrescentando termos convenientes para que o resultado se aproxime do real.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia. Conforto térmico. Trocador de calor.

#### ABSTRACT

With the increase of world energy consumption, technologies have been developed aiming save and reduce the production cost. About one third of all energy consumed has been used in climate systems (heating or cooling). In this approach, the soil has been used as a heat exchanger because its high thermal inertia and the air exchanges heat with the soil to reach the environment at comfortable temperature. In order to solve the coupled energy and mass transfer equations, the implementation of governing mass transfer equation in the Ansys Fluent commercial software have been studied. In this context, an equation has been developed and interpreted as temperature and heat transfer on the upper surface of the volume. These equations have been used as the boundary conditions for the proposed problem. The results showed that the simplifications made to implement the equation generated a large error, therefore, the equation must be developed by adding convenient terms for the result closer to real.

**KEYWORDS:** Energy. Thermal comfort. Heat exchanger.

João Victor Reia Catelan

[joacatelan2@gmail.com](mailto:joacatelan2@gmail.com)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil.

Gerson Henrique dos Santos

[gsantos@utfpr.edu.br](mailto:gsantos@utfpr.edu.br)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil.

**Recebido:** 19 ago. 2019.

**Aprovado:** 01 out. 2019.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

O consumo de energia vem crescendo exponencialmente no mundo. Com a sombra de uma crise energética, os países estão apoiando o desenvolvimento de novas tecnologias visando economizar e reduzir o custo. Nesta abordagem, os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) podem contribuir para a redução da demanda energética nos edifícios (PEREZ-LOMBARD, ORTIZ e MAESTRE, 2011).

Visando diminuir o consumo de energia nas edificações, uma das soluções que vem sendo estudadas por diversos pesquisadores é a de utilizar o solo como trocador de calor em sistemas de climatização (MISRA et al., 2013). Esse sistema consiste em uma tubulação enterrada onde o ar flui, vindo do próprio ambiente ou de um ambiente externo e tem sua temperatura variada até ficar em equilíbrio com o solo ou sair da tubulação sendo enviado para o ambiente fechado. Esse comportamento é possível pela alta capacidade térmica do solo que mantém sua temperatura em determinadas profundidades, independentemente das condições climáticas na superfície durante o ano.

Brum et. al. (2018) estudam colocar mais de 1 tubo no solo com configurações diferentes para que a troca de calor seja aumentada mantendo a mesma área transversal de apenas 1 tubo. A partir de simulações, constatou-se que a melhor geometria para a troca de calor acontece quando são 4 tubos na configuração de diamante ou quando são 5 tubos na configuração retangular com um tubo ao centro.

Visando avaliar a diminuição da temperatura quando o diâmetro do tubo tem aumento de 2 para 3 pol., Seralgeldin et al. (2016) elaborou um modelo matemático e realizou análises experimentais e numéricas. Os valores obtidos para o ar de saída foram de 20.4°C para 18.7°C, respectivamente. Esse fato se deve pelo aumento da área de transferência de calor para o tubo com maior diâmetro. Mathur et al. (2017) analisaram numericamente e experimentalmente uma configuração em espiral para os tubos e compararam com a configuração mais utilizada (retilínea) revelando que ambas têm condições de utilização e desempenho térmico parecidos.

Nesse contexto, Vasconcellos, Santos e Stamoulis (2017) analisaram numericamente a partir de simulações computacionais alguns solos considerando o nível de saturação em cada caso concluindo que os solos saturados têm maior condutividade térmica e, conseqüentemente, desempenho térmico superior.

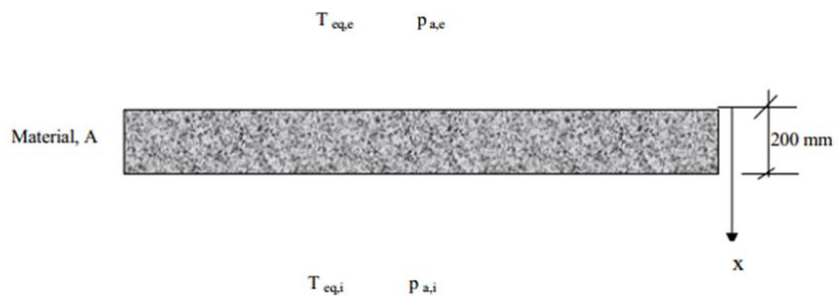
Com o objetivo de aumentar a eficiência energética das edificações, vários sistemas foram desenvolvidos e muitos deles simulados em ferramentas computacionais avançadas (MELLO, 2017). Para que as simulações sejam possíveis, algumas simplificações são, geralmente, consideradas, mas isso tende a aumentar as incertezas no modelo proposto retirando a precisão nos resultados.

Para resolver as equações da energia e transferência de massa acopladas, foi estudada a implementação da equação governante de transferência de massa no software comercial *Ansys Fluent*. Buscando uma situação real, foi desenvolvida a equação para ser interpretada como a temperatura e transferência de calor na superfície superior do volume. Essas equações seriam utilizadas como as condições de contorno para o problema proposto.

## MATERIAL E MÉTODOS

Visando resolver a equação da transferência de massa em um meio poroso, buscou-se caminhos utilizando os conhecimentos adquiridos em trabalhos anteriores. Hangentoft (1999) utilizou uma transferência de calor e massa em uma camada homogênea em uma dimensão considerando condições isotérmicas. O problema está mostrado na Figura 1, as propriedades do material utilizado estão mostradas no Quadro 1 e as condições de contorno no Quadro 2.

Figura 1 – Estrutura do problema verificado.



Fonte: Hangentoft (1999)

Quadro 1 – Propriedades do material do problema verificado.

Teor de água (w)	$\frac{116}{(1 - \frac{1}{0,118} * \ln(\phi))^{0,869}}$	Kg/m <sup>3</sup>
Difusividade do vapor ( $\delta_v$ )	$10^{-15}$	s
Condutividade térmica (k)	0,15	W/mK
Calor específico	800	J/KgK
Densidade	525	Kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Hangentoft (1999)

Quadro 2 – Condições de contorno do problema verificado.

Temperatura externa (Text)	20	°C
Temperatura interna (Tint)	20	°C
Humidade relativa interna	65%	-
Humidade relativa externa	45%	-

Fonte: Hangentoft (1999)

No teor de água da parede,  $\phi$  é a humidade relativa no ponto onde se deseja calcular o teor de água, que pode ser calculada pela equação (1).

$$\phi = \frac{P_v}{P_{sat}} \quad (1)$$

Onde  $P_v$  é a pressão relativa de vapor no ponto e  $P_{sat}$  é a pressão de saturação da água a determinada temperatura.

Com as condições acima implementadas, o software resolve de maneira iterativa as equações governantes do problema para energia (equação (2)) e para o diferencial de pressão (equação (3)) desacopladas.

$$\frac{dH}{dt} = \nabla(k\nabla T) \quad (2)$$

$$\frac{dw}{dt} = \nabla(\delta_v \nabla P_v) \quad (3)$$

A temperatura inicial da parede é de 20°C e umidade relativa de 95%. Analisou-se o problema em regime transiente. A malha foi gerada no Ansys Meshing utilizando as condições padrões do software. Após esse processo, implementou-se a equação para cálculo da transferência de massa utilizando uma UDS (*User Defined Scalar*) onde busca-se a umidade relativa dos pontos com o passar do tempo. As simulações foram feitas para 100h, 300h e 1000h com passo de tempo de 3600s e no máximo 200 iterações por passo de tempo. O critério de convergência utilizado foi de 10e-6.

Buscando diminuir tempo de simulação e encontrar resultados mais precisos, foi gerada outra malha para comparação com a gerada a partir das configurações padrão do software. Na malha 2, aumentou-se a quantidade de elementos e foi refinada nas extremidades onde as condições de contorno são aplicadas. Os dados das duas malhas estão na Quadro 3.

Quadro 3 – Nós e elementos das malhas analisadas.

	Malha 1	Malha 2
Nós	441	1681
Elementos	400	1600

Fonte: Autoria própria.

Em paralelo a esse processo foram desenvolvidas as equações com entrada de temperatura senoidal modelada a partir da temperatura diária, cuja qual é dependente do tempo da simulação, tem um pico perto das 15h e um vale às 3h para ser implementada no problema após a verificação. A equação (4) mostra a temperatura senoidal, em Kelvin, em função do tempo para o inverno.

$$T(t) = 293 + 5\text{sen}\left(3.1415 + \left(\frac{3.1415t}{43200}\right)\right) \quad (4)$$

Para modelar o verão, a equação (5) mostra que é necessário modificar a temperatura média de 293K para 298K.

$$T(t) = 298 + 5\text{sen}\left(3.1415 + \left(\frac{3.1415t}{43200}\right)\right) \quad (5)$$

Nesses casos apresentados, a radiação solar não foi considerada, porém ela exerce grande influência no problema. Baseando-se em Santos e Mendes (2005) podemos considerar que o termo da radiação varia diariamente e anualmente como mostrado na equação (6).

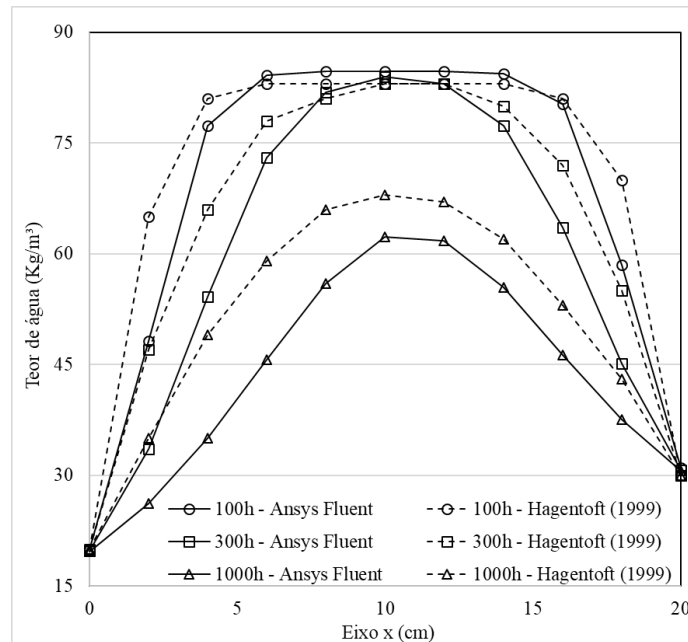
$$q_r(t) = \left( (600 + 200\text{sen}(3.1415 + (3.1415t/31536000))) * \sin\left(\left(3 * \frac{3.1415}{2}\right) + \left(3.1415 * \frac{t}{43200}\right)\right) \right) \quad (6)$$

Essas equações podem ser implementadas no problema após sua verificação e precisam ser acrescidas de termos para modelar as condições de contorno de entrada de umidade no volume de controle.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisou-se o trabalho feito por Hagentoft (1999), implementou-se as equações no software *Ansys Fluent*. A Figura 2 mostra a comparação entre as duas simulações para 100h, 300h e 1000h.

Figura 2 – Verificação da implementação das equações.

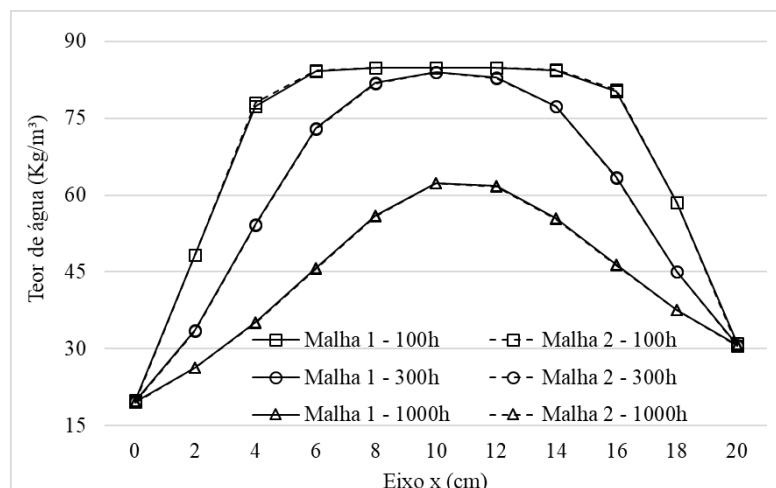


Fonte: Autoria própria.

As simplificações fizeram com que os resultados fossem divergentes em determinados pontos, porém a distribuição dos dois modelos é parecida e isso mostra que são necessários alguns ajustes, mas a base teórica da simulação está sendo calculada de maneira correta.

Dessa forma, foi analisada a sensibilidade de malha. A figura 3 mostra a comparação entre as duas malhas analisadas.

Figura 3 – Comparação das malhas analisadas.



Fonte: Autoria própria.

A partir dos dados apresentados é possível observar que o refinamento da malha não gerou resultados consideravelmente diferentes para o problema. Por esse fato, é mais interessante utilizar a malha gerada automaticamente pelo software.

## CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que as simplificações feitas para implementação da equação geraram um erro grande a ponto de ser necessário que a equação seja melhor trabalhada acrescentando termos convenientes para que o resultado se aproxime do real.

A partir da implementação da equação com todos os termos, pode-se utilizar a malha padrão gerada pelo *Ansys Fluent* pois nos mostra o mesmo resultado com menos elementos, ou seja, menor tempo de simulação. Tendo tudo implementado e verificado, pode-se utilizar as equações (4), (5) e (6) para resolver o problema com condições de contorno reais.

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – a Secretaria da Ciência e Tecnologia do Brasil e a Fundação Araucária pelo suporte a esse trabalho.

## REFERÊNCIAS

PEREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J. e Maestre, I. R.; The map of energy flow in HVAC systems. **Applied Energy**, Vol. 88, p. 5020-5031, 2011.

MISRA, R.; BANSAL, V.; AGRAWAL, G.; MATHUR, J. e ASERI, T. CFD analysis based parametric study of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger. **Applied Energy**, Vol. 103, pp. 266-277, Mar. 2013.

BRUM, R.; RAMALHO, J.; RODRIGUES, M.; ROCHA, L.; ISOLDI, L. e SANTOS, E. Design evaluation of Earth-air heat exchangers with multiple ducts. **Renewable Energy**, p 1-15, 2018.

SERALGELDIN, A.; ABDELRAHMAN, A. e OOAKAWARA, S. Air Heat Exchanger thermal performance in Egyptian conditions: Experimental results, mathematical model, and Computational Fluid Dynamics simulation. **Energy Conversion and Management**, Vol. 122, pp. 25-38, 2016

MATHUR, A.; PRIYAM, S; MATHUR, S.; AGRAWAL, G. e MATHUR, J. Comparative study of straight and spiral earth air tunnel heat exchanger system operated in cooling and heating modes, **Renewable Energy**, Vol. 108, pp. 474-487, 2017.

VASCONCELLOS, D.; SANTOS, G. e STAMOULIS, M. CFD Analysis of an Earth-Pipe-Air Heat Exchanger. **24 International Congress of Mechanical Engineering – COBEM 2017**, Curitiba, PR, Brazil.

MELLO, L. Advanced modelling of heat, air and moisture (HAM) transfer through porous building elements, **Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)**, Pontificia Universidade Católica, Curitiba, Paraná, 2017.

HAGENTOFT, C. Determination of liquid water transfer properties of porous building materials and development of numerical assessment methods. **Technical Report 960**, Chalmers University of Technology, Sweden, 1999.

SANTOS, G. e MENDES, N. Simultaneous heat and moisture transfer in soils combined with building simulation. **Energy and buildings**, vol. 38, p.303, 2005.