



Análise dos efeitos das propriedades térmicas do solo no desempenho de um trocador de calor solo-ar

Analysis of the effects of soil thermal properties on the performance of an earth-air heat exchanger

Gustavo Chaves Carraro¹, Gerson Henrique dos Santos²

RESUMO

Atualmente o consumo de energia elétrica para fins de climatização de ambientes é alto, e maneiras de se fazer isso de forma mais sustentável se tornam algo desejável. Nesse contexto, os trocadores de calor solo-ar (TCSA) são uma alternativa. Esses sistemas promovem a circulação de ar em tubulações enterradas em certa profundidade do solo e usam de sua inércia térmica para resfriar ou aquecer o ar do ambiente dependendo da estação do ano. Este trabalho tem por finalidade estudar como as propriedades térmicas de diferentes solos e suas saturações afetam seu desempenho por meio de um estudo em CFD (*Computational Fluid Dynamics*) utilizando um modelo computacional baseado no TCSA construído na UTFPR – Ponta Grossa.

PALAVRAS-CHAVE: climatização, mecânica dos fluidos computacional, trocador de calor solo-ar

ABSTRACT

Currently, electricity consumption for environmental conditioning is high, and finding more sustainable ways to do this is becoming desirable. In this context, Earth-Air Heat Exchangers (EAHE) are an alternative. These systems promote the circulation of air in underground pipes at a certain depth in the soil and use its thermal inertia to cool or heat the air depending on the season. This research aims to analyze how the thermal properties of different soils and their saturations affect their performance through a Computational Fluid Dynamics (CFD) study using a computational model based on the EAHE built at UTFPR – Ponta Grossa.

KEYWORDS: air conditioning, computational fluid dynamics, Earth-Air Heat Exchanger

INTRODUÇÃO

O uso de sistemas de ar-condicionado para climatização representa quase 20% da eletricidade consumida em todo o mundo, com previsão de aumento devido ao desenvolvimento econômico e crescimento populacional em regiões mais quentes, tendo o consumo de energia elétrica para climatização crescido mais do que para qualquer outro fim entre 1990 e 2016, mais do que triplicando, como mostrado pela *International Energy Association* (2018). Nesse contexto, os trocadores de calor solo-ar (TCSA) são uma alternativa sustentável que utiliza a inércia térmica do solo para climatizar, reduzindo o consumo de energia elétrica.

Khabbaz *et al* (2015) elaboraram um modelo experimental de um TCSA e compararam os resultados com os obtidos em um modelo computacional, sendo observado que o TCSA conseguia resfriar o ar em até 13°C em um dia quente em Marrakesh. D'Agostino *et al* (2020) fizeram a comparação do desempenho de um TCSA por um modelo numérico em solos e climas de diferentes cidades do mundo, mostrando como esses parâmetros influenciam na performance do TCSA. Brum (2013) elaborou um modelo experimental de um TCSA e um modelo numérico que foi validado após comparação com

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. E-mail: gustavocarraro@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 7976968586533158.

² Docente no Curso de Engenharia Mecânica/DAMEC. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil. E-mail: gsantos@utfpr.edu.br. ID Lattes: 0407596573800004.

os dados experimentais, sendo visto que o sistema era capaz de resfriar o ar em até 7°C em um dia de verão e esquentá-lo em até 3°C em um dia de inverno.

Com a validação do modelo computacional do TCSA construído na UTFPR – Ponta Grossa, detalhada no trabalho de Diedrich *et al* (2023), é visado neste trabalho expandir o escopo da pesquisa avaliando o desempenho desse sistema de forma numérica em diferentes solos em um dia de verão e em um dia de inverno.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o estudo numérico apresentado neste trabalho é baseada no uso da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para resolver as equações de Navier-Stokes Médias de Reynolds (URANS), utilizando o software ANSYS/Fluent® versão 2021 R1 para esse fim. Para prever o comportamento do solo ao longo do ano em diversas profundidades, foi utilizado o modelo proposto por Kusuda (1965). Para realizar as simulações, foi utilizado o modelo de turbulência $k - \epsilon$ Standard e o algoritmo SIMPLE.

GEOMETRIA E GERAÇÃO DA MALHA NO ANSYS®

A geometria do TCSA foi reproduzida usando o ANSYS® *Design Modeler*, seguindo as dimensões do modelo real construído na UTFPR – Ponta Grossa (mostrado na Figura 1), conforme apresentado em Diedrich *et al* (2021). As dimensões do TCSA e do domínio do solo são mostrados na Tabela 1 e na Tabela 2, respectivamente, resultando na geometria exibida na Figura 2.

Tabela 1 - Dimensões do TCSA.

Número de passos	Distância entre os tubos	Profundidade	Diâmetro Externo	Comprimento Total
8	0,5m	1,5m	0,1m	48,2m

Fonte: DIEDRICH *et al* (2021).

Tabela 2 - Dimensões da geometria do domínio do solo.

Comprimento	Largura	Altura
6,7m	4,75m	1m

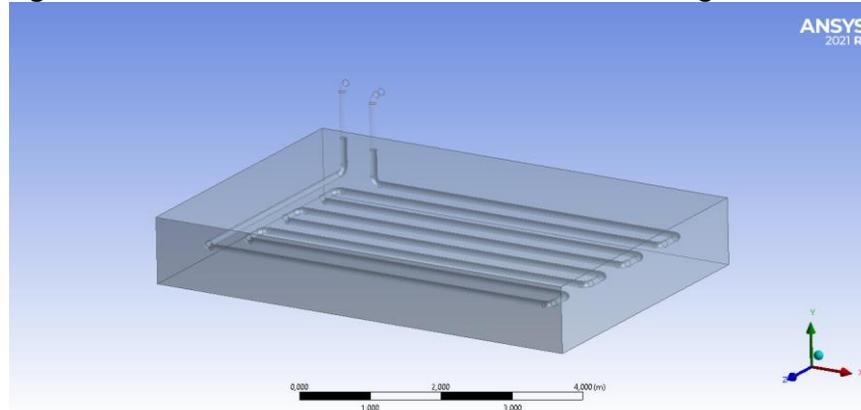
Fonte: Autoria própria.

Figura 1 – Modelo Experimental do TCSA construído na UTFPR – Ponta Grossa



Fonte: Diedrich *et al* (2021).

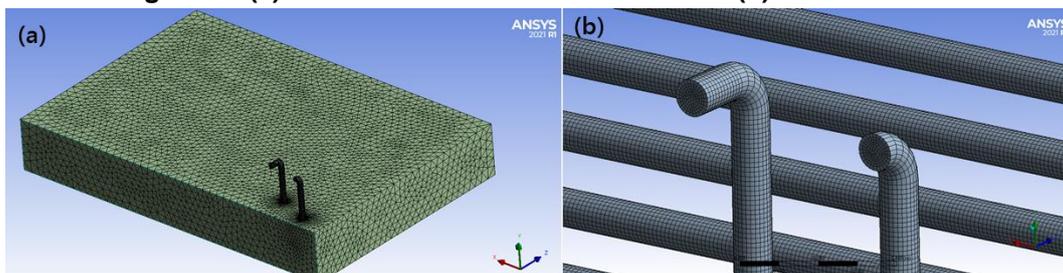
Figura 2 – Geometria criada utilizando o ANSYS® Design Modeler



Fonte: Autoria própria.

A malha gerada é mostrada na Figura 3, possuindo 3.683.460 elementos, e utilizando a métrica "Orthogonal Quality" foi observado que o elemento de pior qualidade tinha o valor de 0,15799, seguindo a recomendação de que este seja maior do que 0,1.

Figura 3 - (a) Malha do domínio do solo e do ar / (b) Domínio do ar



Fonte: Autoria própria.

CONDIÇÕES DE CONTORNO E ANÁLISE DAS TEMPERATURAS DO SOLO

A velocidade de entrada do ar foi definida em 0,774 m/s, baseando-se nos dados experimentais obtidos do TCSA. As paredes laterais do domínio do solo foram consideradas adiabáticas. Para a saída do TCSA, foi usada a condição de pressão manométrica igual a zero, e a opção "Coupled Wall" foi utilizada para as regiões de contato.

Em relação à temperatura de entrada, *User Defined Functions* (UDFs) foram utilizadas. Elas foram criadas por meio de ajustes de curva com polinômios de sexto grau. Esses polinômios foram gerados usando dados experimentais relacionados às temperaturas de entrada durante um dia de verão (23/01/2022) e um dia de inverno (20/08/2022). Em ambos os casos, foram gerados dois polinômios para obter maior precisão.

Quanto às paredes superior e inferior, foi usada a condição de contorno de temperatura fixa, com base nas temperaturas médias dos solos analisados a 1m e 2m de profundidade, respectivamente, nos dias 23/01/2022 e 20/08/2022. Para obter essas temperaturas, foi utilizado o modelo proposto em Kusuda (1965), mostrado na Eq. 1.



$$T_{solo}(z, t) = \bar{T}_{sup} + a_{sup} \cdot e^{-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{365 \cdot \alpha}}} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365}(t - t_{max}) - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi \cdot \alpha}}\right) \quad (1)$$

Na Eq. (1), z é a altura, t é o tempo, em dias, \bar{T}_{sup} é a temperatura superficial média do solo, t_{max} é o dia do ano no qual a maior temperatura superficial do solo foi alcançada, a_{sup} é a amplitude térmica do solo e α é a difusividade térmica. Os parâmetros utilizados na Eq. (1) são mostrados na Tabela (3), e foram obtidos com base no trabalho de MENDES *et al.* (2006), e as propriedades dos solos analisados são mostradas na Tabela (4), seguindo os valores apresentados no trabalho de Hamdhan (2010).

Tabela 3 - Parâmetros utilizados na Eq. (1)

\bar{T}_{sup}	a_{sup}	t_{max} (dia)
20,45°C	7,13°C	11

Fonte: Mendes *et al.* (2006).

Tabela 4. Propriedades térmicas dos solos estudados

	Solo arenoso (seco)	Solo arenoso (saturado)	Solo argiloso (seco)	Solo argiloso (saturado)
$k(W/(m.K))$	0,27	3,34	0,25	1,52
$\rho(kg/m^3)$	1700	2080	1390	1730
$C_p(J/(kg.K))$	800	1483	800	2362
$\alpha(m^2/dia)$	0,01715	0,09355	0,01942	0,03213

Fonte: Hamdhan (2010).

A partir disso, foi possível verificar as flutuações térmicas ao longo do ano dos solos estudados nas profundidades de 1m e 2m abaixo da superfície. Com isso, as temperaturas das faces superior e inferior do domínio do solo foram definidas conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Temperaturas de cada solo analisado a 1m e 2m de profundidade nos dias 23/01/2022 e 22/08/2022.

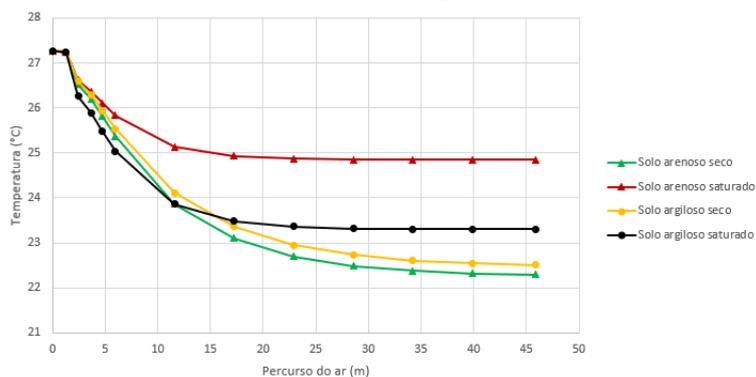
Solo	Profundidade	23/01/2022	20/08/2022
		Temperatura (°C)	
Arenoso (seco)	1m	23,4985	17,2429
	2m	21,0319	18,7930
Arenoso (saturado)	1m	25,6804	16,8747
	2m	24,0035	17,0784
Argiloso (seco)	1m	23,7061	16,7860
	2m	21,2327	18,6061
Argiloso (saturado)	1m	24,4724	16,9670
	2m	22,1293	17,9284

Fonte: Autoria própria.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

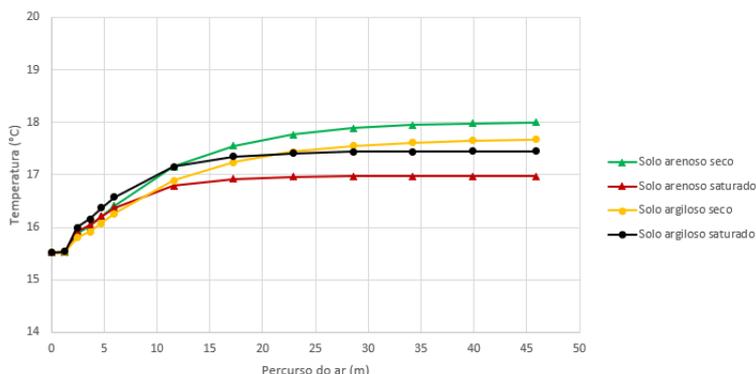
As Figuras 4 e 5 mostram as temperaturas médias ao longo do dia no trocador de calor para cada solo nos dias 23/01/2022 e 20/08/2022, respectivamente.

Figura 4 - Temperaturas médias ao longo do TCSA no dia 23/01/2022.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5 - Temperaturas médias ao longo do TCSA no dia 20/08/2022.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 6 mostra as temperaturas na entrada e na saída do TCSA para os quatro solos estudados no horário em que a temperatura de entrada foi a mais quente no dia 23/01/2022 (18:00) e no horário em que ela foi a mais fria no dia 20/08/2022 (04:00).

Tabela 6. Temperaturas na entrada e na saída do TCSA (°C) às 18:00 do dia 23/01/2022 e às 04:00 do dia 20/08/2022.

	Arenoso(seco)	Arenoso(saturado)	Argiloso(seco)	Argiloso(saturado)
23/01-Entrada	29,7943°C	29,7943°C	29,7943°C	29,7943°C
23/01-Saída	22,3106°C	24,8450°C	22,5285°C	23,3030°C
20/08-Entrada	15,0692°C	15,0692°C	15,0692°C	15,0692°C



20/08-Saída	18,0120°C	16,9763°C	17,6889°C	17,4474°C
-------------	-----------	-----------	-----------	-----------

Fonte: Autoria própria

Ao analisar as Figuras 4 e 5, junto com a Tabela 6, fica evidente que o solo arenoso seco teve o melhor desempenho em ambos os casos: no horário mais quente do dia de verão, conseguiu resfriar o ar em até 7,4837°C, e no mais frio do de inverno, aquecê-lo em 2,9428°C. No entanto, quando saturado, o mesmo solo arenoso teve o pior desempenho, esfriando o ar em 4,9493°C no horário mais quente do verão e aquecendo-o em 1,9071°C no momento mais frio do inverno. As figuras 5 e 6 também mostram que o solo seco supera o saturado em ambos os casos. Em média diária, o solo arenoso seco resfriou o ar em 2,5344°C a mais do que o saturado em 23/01/2022 e aqueceu o ar em 1,0357°C a mais do que o saturado em 20/08/2022. Quanto ao solo argiloso, no dia de verão, a temperatura média de saída do solo seco foi 0,7745°C mais baixa do que a do solo saturado, e no de inverno, 0,2415°C mais alta.

CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados, foi constatado que o solo arenoso seco teve o melhor desempenho tanto para resfriar o ar em um dia de verão como para esquentá-lo em um dia de inverno, seguido pelo solo argiloso seco. Isso indica que os solos secos, que possuem uma difusividade térmica menor, são mais eficientes nessa aplicação do que os solos saturados.

Os solos saturados, com uma difusividade térmica maior, apresentaram uma amplitude térmica maior do que a dos solos secos ao longo do ano, sendo mais quentes no verão e mais frios no inverno em relação aos solos secos, e em consequência disso não tiveram uma performance tão boa como a dos solos secos, o que pôde ser verificado ao visualizar as Figuras 4 e 5 e a Tabela 6.

Agradecimentos

Os agradecimentos são ao professor orientador Gerson Henrique dos Santos e aos órgãos e instituições que apoiaram este projeto de pesquisa: a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e as agências de fomento brasileiras de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

BRUM, R. S. **Modelagem computacional de trocadores de calor solo-ar**. Tese de Mestrado, UFRGS, 2013.



D'AGOSTINO, D et al. **The Energy Performances of a Ground-to-Air Heat Exchanger: A Comparison Among Köppen Climatic Areas.** *Energies*, 2020.

DIEDRICH, C. H., SANTOS, G. H., CARRARO, G. C., DIMBARRE, V. V., ALVES, T. A. **Numerical and Experimental Analysis of an Earth–Air Heat Exchanger.** *Atmosphere* 2023, 14, 1113.

DIEDRICH, C. H., VASCONCELLOS, D. P., DIMBARRE, V. V., SANTOS, G. H., ALVES, T. A. **Trocador de Calor Solo-Ar (TCSA): Uma Alternativa Sustentável para Condicionamento de Ar.** XXII CONEMI, 2021.

HAMDHAN, I. N., CLARKE, B. G. **Determination of Thermal Conductivity of Coarse and Fine Sand Soils.** World Geothermal Congress, 2010.

International Energy Agency (IEA). **The future of cooling: opportunities for energy efficient air conditioning.** Paris, 2018.

KHABBAZ, M et al. **Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger for buildings air refreshment in Marrakech.** 14th International Conference of the International Building Performance Simulation Association, 2015.

KUSUDA, T., ARCHENBACH, P. R. **Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States.** ASHRAE Transactions, Vol. 71, Part 1, 1965.

MAIA, L. H. **Comparação Numérica-Experimental do Desempenho Térmico de um Trocador de Calor Solo-Ar.** Trabalho de Conclusão de Curso, UTFPR – Ponta Grossa, 2022.

MENDES, N., SANTOS, G. H., FREIRE, R.Z., ABADIE, M.O. **Heating and Cooling Potential of Buried Pipes in South Brazil.** 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2006.

VICTORIA, L. C et al. **Estudo numérico de desempenho de trocadores de calor solo-ar em cidades do Rio Grande do Sul.** *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 43, Ed. Esp. X ERMAC RS, e5, p. 1-12, 2021.