



REVISTA BRASILEIRA DE **ENERGIAS RENOVÁVEIS**

ESTUDO DO POTENCIAL TÉRMICO DE TROCADOR DE CALOR SOLO-AR EM DOIS TIPOS DE SOLOS NO MUNICÍPIO DE RIO GRANDE (RS) ¹

MICHEL KEPES RODRIGUES², FELIPE SILVA COSWIG³, KARINA RETZLAFF
CAMARGO⁴, RUTH DA SILVA BRUM⁵, LUIZ ALBERTO OLIVEIRA ROCHA⁶,
JOAQUIM VAZ⁷ ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS⁷, LIÉRCIO ANDRÉ ISOLDI⁷

¹Apresentado no 7º Conferência Sul em Modelagem Computacional (MCSul) e do VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica (SEMENGO).

²Doutorando em Modelagem Computacional na Universidade Federal do Rio Grande, michel.professor@yahoo.com.br.

³Graduado em Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Rio Grande, felipecoswig@hotmail.com.

⁴Professora Mestre da Escola de Engenharia na Universidade Federal do Rio Grande, karinaretzlaff@gmail.com.

⁵Professora Doutora do Departamento de Matemática e Estatística na Universidade Federal de Pelotas, ruthdasilvabrum@gmail.com.

⁶Professor Doutor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, luizrocha@mecanica.ufrgs.br.

⁷Professor Doutor da Escola de Engenharia na Universidade Federal do Rio Grande, joaquirvaz@furg.br, elizaldosantos@furg.br, liercioisoldi@furg.br.

RESUMO: A engenharia contemporânea evolui no sentido do desenvolvimento de métodos e aplicações para utilização de energias renováveis visando minimizar ações danosas ao meio ambiente. O solo, por sua vez, desempenha importante papel no princípio físico de funcionamento do Trocador de Calor Solo-Ar (TCSA), pois ora cede, ora absorve o calor para o ar, que escoar no interior dos dutos. Consequentemente, as propriedades termofísicas do solo influenciam no desempenho térmico do TCSA. Então, o objetivo deste trabalho é estimar o desempenho térmico do TCSA para dois diferentes perfis geotécnicos de solos considerados. Para isso, a modelagem computacional foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho. Através dos resultados obtidos, foi constatado que, o TCSA, quando instalado em solo com característica argilosa, apresenta melhor desempenho térmico se comparado a uma instalação em solo arenoso. Também se constatou que nem sempre o potencial de resfriamento e aquecimento do TCSA aumenta com a profundidade de instalação do duto. O perfil geotécnico do solo tem influência fundamental no desempenho do TCSA, sendo necessário considerar suas características para um projeto adequado deste dispositivo. Dessa forma, a principal contribuição deste trabalho consistiu no desenvolvimento de metodologia para avaliar distintos perfis de solo para modelagem de TCSA.

Palavras-chave: Trocador de Calor Solo-Ar, propriedades termofísicas, potencial térmico.

STUDY OF THE THERMAL POTENTIAL OF EARTH-AIR HEAT EXCHANGER IN TWO TYPES OF SOILS IN THE RIO GRANDE CITY (RS)

ABSTRACT: Contemporary engineering evolves towards the development of methods and applications for the use of renewable energies in order to minimize harmful actions to the environment. The soil, in turn, plays an important role in the physical principle of the operation of the Earth-Air Heat Exchanger (EAHE), because it now gives way to the heat and absorbs heat into the air, which flows into the ducts. Consequently, the thermophysical properties of the soil influence the thermal performance of the EAHE. So, the objective of this work is to estimate the thermal performance of the EAHE for two different geotechnical profiles of soils considered. For this, computational modeling was essential for the development of this work. Through the obtained results, it was verified that, when installed in

soil with clayey characteristics, the EAHE presents better thermal performance when compared to an installation in sandy soil. It was also found that the cooling and heating potential of the EAHE is not always increased with the duct installation depth. The geotechnical profile of the soil has a fundamental influence on the performance of the EAHE, being necessary to consider its characteristics for an adequate design of this device. Thus, the main contribution of this work was the development of a methodology to evaluate different soil profiles for the modeling of EAHE.

Keywords: Earth-Air Heat Exchanger, thermophysical properties, thermal potential.

INTRODUÇÃO

O Trocador de Calor Solo-Ar (TCSA) pode ser utilizado para promover a melhoria na condição térmica no interior de edificações por meio da redução do consumo de energia elétrica de equipamentos de ar condicionado tradicionalmente utilizados, aproveitando a energia solar absorvida pelas camadas superficiais do solo (subsolo). O TCSA é um sistema constituído por um ou mais dutos dispostos no subsolo por onde o ar escoa movido pela ação de ventiladores. O princípio de funcionamento está embasado em transferir calor do solo para o ar em períodos frios e ceder calor do ar para o solo em períodos quentes. Com isso, é possível oferecer uma melhoria na condição térmica de ambientes construídos, objetivando diminuir o consumo de energia elétrica (Rodrigues et al. 2015a).

Em Givoni e Katz (1985), Jacovides et al. (1996), Mihalakakou et al. (1997), Bharadwaj e Bansal (1981) e Mihalakakou et al. (1995) são relacionados trabalhos tratando do perfil do campo de temperaturas no subsolo em decorrência da profundidade e da oscilação térmica em função do tempo. Essa literatura fornece base para o entendimento do comportamento térmico do solo. No entanto, o princípio de funcionamento do TCSA, bem como suas aplicações, pode ser visualizado em Mihalakakou et al. (1994), Santamouris et al. (1995), Isoldi et al. (2013), Vaz (2011), Vaz et al. (2011), Rrum et al. (2012), Brum et al. (2013), Vaz et al. (2014), Rodrigues et al. (2015b), Do et al. (2015), Ferraz (2015), Kaushala et al. (2015), Gan (2015), Nunes (2015), Rodrigues et al. (2014), Nunes et al. (2015), Ferraz et al. (2015), Marzarotto et al. (2015), Brum et al. (2014) e Rodrigues et al. (2015c).

O solo, dependendo do enfoque, tem sido estudado como produto do intemperismo físico e químico das rochas (Geologia); material da crosta terrestre que não oferecesse resistência intransponível à escavação mecânica e perda da resistência, quando em contato prolongado com a água (Engenharia); camada superficial de terra que leva em consideração

aspectos biológicos, plantas e clima (Agronomia) (Brady e Weil, 2013). Assim sendo, as características constitutivas do solo determinam um importante papel no presente estudo, na medida em que implicam diretamente no desempenho térmico do TCSA. Nesse contexto, o potencial térmico mensal (*PT*) do TCSA é um importante indicador que vem sendo utilizado para mensurar quantitativamente o desempenho térmico deste dispositivo (Rodrigues et al., 2015a; Rodrigues et al., 2015c).

Portanto, o objetivo deste trabalho é estudar o *PT* de um TCSA considerando as propriedades de dois perfis geotécnicos distintos de solos. Para tanto, foi necessário empregar um modelo computacional, validado e verificado, adaptando-o para ser utilizado levando em consideração os perfis de solos estudados; desenvolver uma metodologia que permita a consideração da influência do lençol freático nas simulações numéricas e avaliar o *PT* do TCSA para diferentes profundidades em cada perfil geotécnico de solo avaliado. Dessa forma, a principal contribuição deste trabalho foi o desenvolvimento de metodologia para avaliar distintos perfis de solo para modelagem de TCSA, uma vez que suas propriedades influenciam no *PT* do TCSA.

MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta o domínio computacional e as condições de contorno do modelo de TCSA aplicado neste trabalho. O modelo adotado é uma simplificação do modelo completo de Vaz (2011) e Vaz et al. (2011). Neste estudo, apenas o trecho reto do duto foi considerado na modelagem computacional. O diâmetro d do duto assumiu o valor de 0,110 m e seu comprimento, assim como o comprimento do domínio computacional, foi denotado por L_s e assumiu o valor de 25,77 m. A largura e a profundidade do domínio computacional são representadas por W_s e H_s , com valores atribuídos de 5,00 m e 15,00 m, respectivamente. A variável h representou a profundidade estabelecida para o duto nos casos que foram simulados computacionalmente.

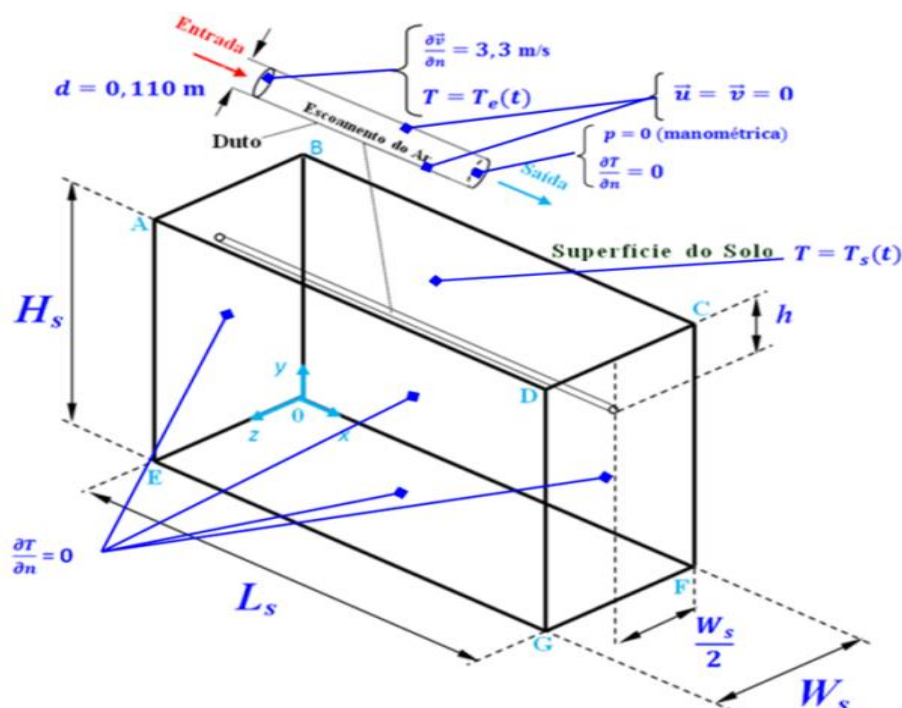


Figura 1: Domínio computacional e condições de contorno do modelo de TCSA.

No que tange às condições de contorno, as faces laterais e a face inferior do solo foram isoladas termicamente. A face superior representa a superfície do solo, cujas temperaturas $T_s(t)$, em função do tempo, foram descritas por uma função periódica ajustada estatisticamente com base em dados experimentais de Vaz (2011) e Vaz et al. (2011). Na entrada do duto foi imposta a velocidade de escoamento do ar de 3,30 m/s e as temperaturas $T_e(t)$ também foram representadas por uma função periódica ajustada estatisticamente através dos dados experimentais de Vaz (2011) e Vaz et al. (2011). Na saída do duto, foi imposta para o ar a condição pressão (manométrica) atmosférica normal denotada por p , e valor igual a zero. Como hipótese simplificativa, na parede do interior do duto foi considerada a condição de não deslizamento, de impermeabilidade e sua espessura não foi considerada na modelagem computacional, ou seja, no modelo, foi admitido o ar escoando em uma perfuração cilíndrica inserida no solo em contato direto com o mesmo (Vaz et al., 2011; Rodrigues et al., 2015a; Rodrigues et al., 2015c).

A modelagem matemática de TCSA consiste nos princípios de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia. Por se tratar de escoamentos turbulentos, também é necessário realizar a modelagem da turbulência (Rodrigues et al., 2015a). Para promover a análise térmica e dinâmica do ar, o seu escoamento no interior do duto foi considerado incompressível, turbulento e descrito pelas equações de conservação de massa, momento e energia (Versteeg e Malalasekera, 2007; Maliska, 2004; Wilcox, 2002; Incropera

et al., 2011).

Foi adotado o modelo de turbulência baseado nas equações de Navier-Stokes médias no tempo, RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), utilizando o modelo de turbulência de Reynolds (RSM) (Rodrigues et al., 2015a; Wilcox, 2002).

A equação da conservação da energia foi utilizada para gerar o campo de temperaturas no solo (Versteeg e Malalasekera, 2007; Incropera et al., 2011). De uma forma geral, tais equações são bem conhecidas e podem ser encontradas na literatura (Versteeg e Malalasekera, 2007; Maliska, 2004; Wilcox, 2002; Incropera et al., 2011). Por conta disso, neste trabalho as mesmas não foram apresentadas em face da brevidade do texto.

A modelagem numérica foi realizada utilizando o software FLUENT (Documentation Manual, 2007). Nesta abordagem computacional também foram empregados os softwares GAMBIT (Documentation Manual, 2006) e EXCEL (Manual Documentation Manual, 2010).

O software FLUENT realizou o processamento e o pós-processamento. Esse software é baseado no método dos volumes finitos (FVM - *Finite Volume Method*). O FVM foi utilizado neste trabalho, pois atende, em nível de volumes elementares, os princípios de conservação da massa, do movimento e da energia (Versteeg e Malalasekera, 2007; Maliska, 2004; Patankar, 1980). Já o pré-processamento foi realizado através do software GAMBIT, onde foi construída a geometria do problema (levando em consideração o perfil geotécnico do solo), a definição do tipo de condição de contorno e a geração da malha computacional. No pós-processamento também foi utilizado o software EXCEL para a análise dos dados e geração dos gráficos.

O algoritmo *Coupled*, de solução acoplada, foi utilizado para tratar do esquema pressão-velocidade e o esquema de advecção *upwind* foi utilizado para tratar os termos advectivos. Nas simulações numéricas foi adotado um passo de tempo de 3.600 s (uma hora) e um total de 17.520 passos de tempo. A temperatura de inicialização do modelo computacional foi de 18,7°C. Neste trabalho, foram simulados computacionalmente dois anos de funcionamento do TCSA, no entanto, apenas os dados obtidos no segundo ano de simulação foram utilizados para análise e discussão de resultados (Rodrigues et al., 2015a; Rodrigues et al., 2015c).

Também compõe esta metodologia o modelo computacional simplificado de TCSA de Brum et al. (2012) validado e verificado com base nos resultados obtidos em Vaz (2011) e Vaz et al. (2011), que foi aperfeiçoado para ser aplicado neste trabalho.

Por fim, a metodologia computacional utilizada neste estudo é conhecida na

literatura como dinâmica dos fluidos computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamics*). Como foi abordado, esse método se baseia na discretização do domínio computacional em um número finito de células e na aplicação do método numérico para a solução do problema (Versteeg e Malalasekera, 2007; Maliska, 2004).

Estudo dos solos

O solo é o material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos e químicos, podendo ou não ter matéria orgânica. No âmbito da Engenharia, entende-se por solo todo o material da crosta terrestre que não oferece resistência intransponível à escavação mecânica e que perde resistência quando em contato por tempo prolongado com água (ABNT, 1995; Caputo, 1989).

A hipótese deste trabalho indica que a constituição do solo influencia diretamente no desempenho térmico do TCSA, uma vez que cada tipo de solo apresenta distintas propriedades e características constitutivas, que podem ser observadas, por exemplo, na massa específica, calor específico e condutividade térmica, bem como na granulometria do solo, presença de água, dentre outras características. Entretanto, estudos sobre os solos demonstram que sua origem e evolução sofrem a influência de cinco fatores: clima, material de origem, presença de organismos, tempo e relevo (NBR 6502, 1995; Caputo, 1989).

Sendo assim, neste trabalho o TCSA foi estudado em dois perfis geotécnicos de solo distintos localizados no município de Rio Grande, Estado do RS, Brasil.

Os dois solos foram avaliados através de relatório de sondagens do tipo SPT (*Standard Penetration Test*), fornecidas pela diretoria de obras da FURG. O ensaio de simples reconhecimento, universalmente conhecido como SPT é uma das sondagens de investigação de subsolo mais utilizadas, tanto no Brasil, como em outros países (Braja, 1996). No âmbito da Engenharia Geotécnica, o amplo emprego deste ensaio deve-se à sua simplicidade, robustez e facilidade de aplicação dos resultados (Braja, 1996).

No ensaio SPT a resistência à penetração dinâmica é caracterizada por um índice de resistência (N_{SPT}), o qual é obtido através da cravação de um amostrador padrão sob a ação da queda de um martelo, com massa de 65 kg, de uma altura de 0,75 m. O valor do N_{SPT} corresponde ao número de golpes necessários para cravação de 0,30 m do amostrador no solo, após uma cravação inicial de 0,15 m.

O primeiro perfil geotécnico de solo estudado foi da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), *campus* carreiros (32°04'27,6"S; 52°10'01,9"W), definido neste trabalho como

solo perfil geotécnico tipo 1 (P-01). O segundo perfil do solo examinado foi do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS), *campus* Rio Grande, (32°02'26,4"S; 52°05'21,6"W) definido neste trabalho como solo perfil geotécnico tipo 2 (P-02).

O solo P-01, de acordo com ensaio SPT, é predominantemente constituído de areia até aproximadamente 1,50 m de profundidade. Uma camada de areia saturada de aproximadamente 13,50 m foi identificada a partir da camada inicial. A partir de 1,50 m da superfície do solo, encontra-se o lençol freático, ou zona de saturação, região onde a água preenche toda a porosidade presente entre os grãos tornando o solo totalmente saturado de água (Fig. 2a).

Já o solo P-02, segundo ensaio SPT, o perfil encontrado é basicamente formado por três camadas. A camada inicial, que vai da sua superfície até uma profundidade média de 0,70 m é constituída de areia. A segunda camada encontrada é de argila orgânica e possui uma camada de aproximadamente 2,00 m. A partir desta profundidade encontra-se areia. O lençol freático se encontra a partir de 0,70 m de profundidade aproximadamente. Portanto, a partir da camada de argila o solo já pode ser considerado completamente saturado (Fig. 2b).

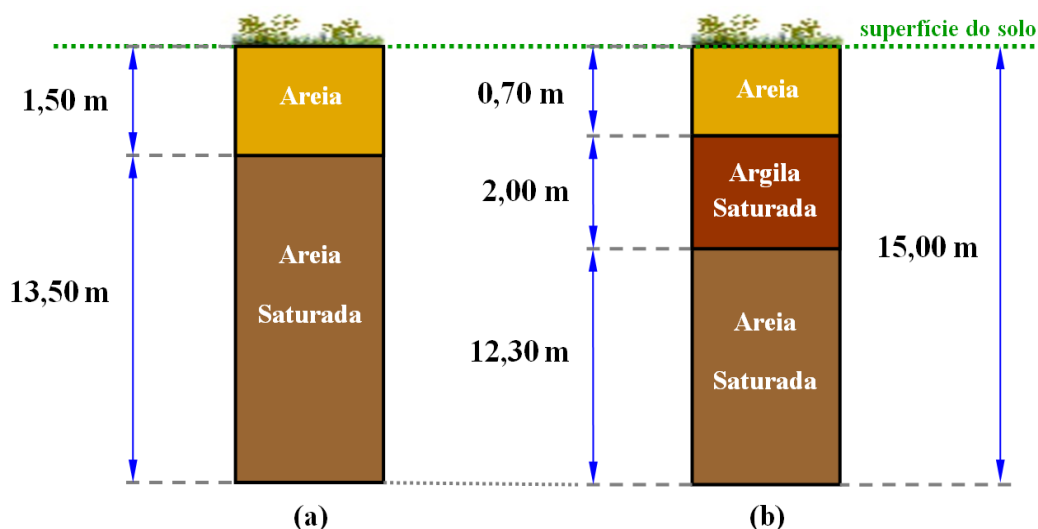


Figura 2: Ilustração do perfil do solo estudado: da FURG (a) e do IFRS (b).

O domínio computacional foi construído e subdividido com auxílio do software GAMBIT de acordo com o perfil e tamanho do volume do solo (ver Figs. 2a e 2b). Já a inserção das propriedades térmicas dos solos foi realizada no software FLUENT.

Para analisar a influência da especificidade dos tipos de solos em estudo devido suas propriedades constitutivas, a difusividade térmica foi a propriedade que serviu de parâmetro de investigação para interpretação dos resultados obtidos com a modelagem computacional. A difusividade térmica (razão entre a condução térmica e a capacidade

calorífica volumétrica) do solo mede a sua capacidade de conduzir a energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la e é expressa por (Incropera et al., 2011):

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (1)$$

onde: α é a difusividade térmica do solo, k é o coeficiente de condutividade térmica do solo, ρ é a massa específica do solo e c_p é o calor específico a pressão constante do solo.

Entretanto, a difusividade térmica do solo considerando a presença de água é dada por (ASHRAE, 2011):

$$\alpha_w = \frac{24 \cdot 3600 \cdot k}{1000 \cdot \rho [c_p + c_{pw}(w/100)]} \quad (2)$$

onde: α_w é a difusividade térmica do solo com presença de água, c_{pw} corresponde ao calor específico a pressão constante da água (Incropera et al., 2011) e w denota o percentual de saturação do solo com água.

Assim, o calor específico a pressão constante do solo totalmente saturado por água é denotado por c_{sa} é expresso por (ASHRAE, 2011):

$$c_{sa} = c_p + c_{pw} \quad (3)$$

Dessa forma, neste trabalho foi levada em consideração a influência da presença de água nas propriedades termofísicas presentes nos perfis de solo analisados, bem como na avaliação qualitativa da difusividade térmica no solo. Dentre os componentes do solo, a presença de água é a mais afetada pelas variações de temperatura e apresenta efeitos importantes nas características dos solos do ponto de vista térmico.

Nesse contexto, a Tab. 1 mostra as propriedades termofísicas dos solos, enquanto que a Tab. 2 apresenta as propriedades dos solos saturados por água. Já a Tab. 3 indica as propriedades do ar considerado na modelagem computacional.

Tabela 1: Propriedades termofísicas dos solos.

Tipos de solo	Massa específica ρ (kg/m ³)	Condutividade térmica k (W/m·K)	Calor específico a pressão constante c_p (J/kg·K)
Areia	1.515	0,2700	800
Argila	1.460	1,3000	880

Tabela 2: Propriedades termofísicas dos solos saturados por água.

Tipos de solo	Massa específica ρ (kg/m ³)	Condutividade térmica k (W/m·K)	Calor específico a pressão constante c_p (J/kg·K)
Areia saturada	1.515	0,2700	4.979
Argila saturada	1.460	1,3000	5.059

Tabela 3: Propriedades termofísicas do ar.

Fluido	Massa específica ρ (kg/m ³)	Condutividade térmica k (W/m·K)	Calor específico a pressão constante c_p (J/kg·K)	Viscosidade dinâmica μ kg/(m·s)
Ar	1,160	0,0242	1.010	$1,798 \cdot 10^{-5}$

Como hipótese simplificativa, os valores de condutividade térmica k foram considerados constantes. Como não há elevadas variações no campo de temperatura na camada superficial do solo, não ocorrem significativas variações nesta propriedade. A massa específica ρ também foi considerada constante por conta de não haver significativas variações nos campos de temperaturas capazes de promover dilatação volumétrica considerável no solo (Rodrigues et al., 2015a; Incropera et al., 2011; Caputo, 1989).

Para avaliar o desempenho térmico do TCSA foi utilizado o PT do TCSA. Basicamente, o PT é uma média mensal da diferença de temperaturas entre a saída e a entrada do ar no duto. Esse parâmetro é utilizado para identificar quantitativamente a variação de temperatura que o ar foi submetido ao trocar calor com o solo ao escoar no interior do duto. O seu valor positivo representa potencial de aquecimento, enquanto que o valor negativo representa potencial de resfriamento. O valor nulo representa equilíbrio térmico e não apresenta potencial de aquecimento ou resfriamento (Rodrigues et al., 2015a; Rodrigues et al., 2015c).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho foi utilizado o modelo computacional de TCSA de Brum et al. (2012), validado e verificado conforme Vaz (2011) e Vaz et al. (2011). No entanto, o mesmo foi adequado à metodologia de subdivisão do domínio computacional para representar as distintas composições das camadas dos perfis geotécnicos dos solos estudados.

O TCSA foi instalado nas profundidades h de 1,00 m; 2,00 m; 3,00 m e 4,00 m para os solos P-01 e P-02. Para cada tipo de solo, quatro simulações numéricas foram realizadas (ver Fig. 1).

A Figura 3a mostra o PT do TCSA, em função do tempo no período de um ano, instalado na profundidade de 1,00 m, enquanto que a Fig. 3b apresenta o desempenho térmico do mesmo na profundidade de 2,00 m, ambas as condições impostas ao solo P-01. É possível observar que na profundidade de 2,00 m se deu maior PT do TCSA, tanto para aquecimento, quanto para resfriamento, sendo, respectivamente, de aproximadamente $2,5^{\circ}\text{C}$ (em junho) e $-4,75^{\circ}\text{C}$ (em dezembro), ao comparar as duas profundidades analisadas. Nesse caso, foi também registrado que mesmo a difusividade térmica da areia saturada sendo menor do que em relação à areia não saturada, o aumento da profundidade ocasionou o aumento do desempenho térmico do TCSA.

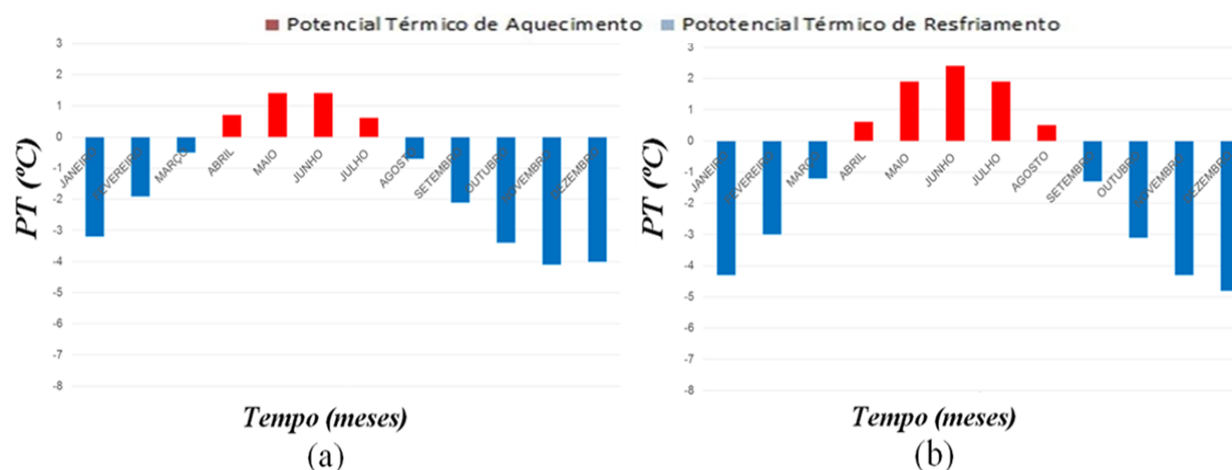


Figura 3: PT do TCSA ao longo do ano no solo P-01: na profundidade de 1,00 m (a) e na profundidade de 2,00 m (b).

Nas Figuras 4a e 4b um comportamento semelhante foi observado em relação à variação do PT mensal do TCSA para as profundidades de instalação do duto de 3,00 m e 4,00 m. Portanto, não houve significativa variação do PT do TCSA instalado no solo P-01,

sendo que, aproximadamente, para ambas as profundidades, foram observadas um potencial de aquecimento de $2,0^{\circ}\text{C}$ (em junho) e resfriamento de $-4,5^{\circ}\text{C}$ (em dezembro). Dessa forma, mesmo para uma mesma composição de solo, o aumento de profundidade não ocasionou um aumento significativo do *PT* do TCSA, o que era de se esperar. Esse fato deve estar relacionado com a difusividade térmica no solo saturado, a qual foi reduzida em função do ganho de água nestas condições.

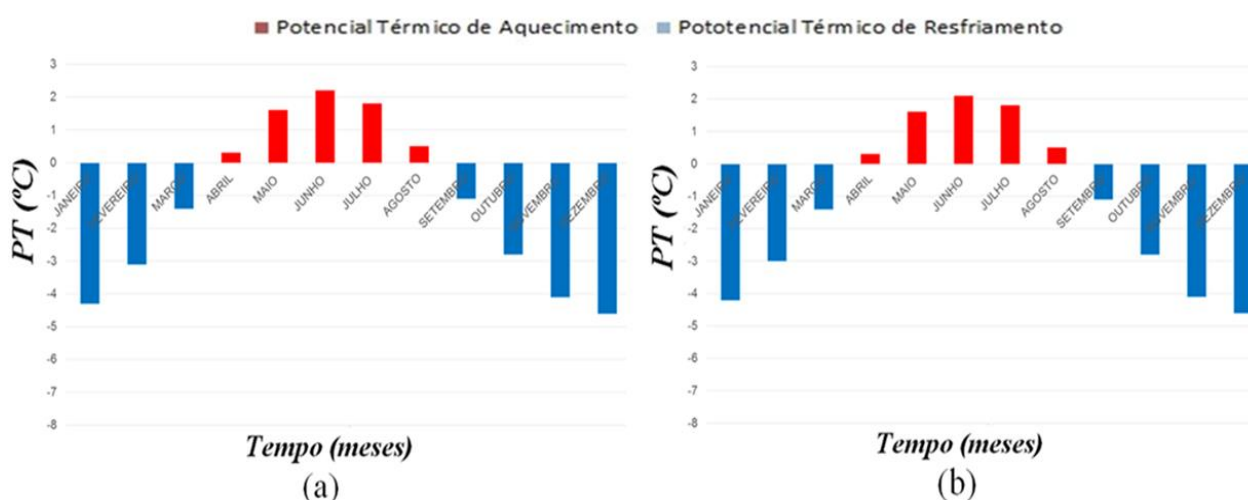


Figura 4: *PT* do TCSA ao longo do ano no solo P-01: na profundidade de 3,00 m (a) e na profundidade de 4,00 m (b).

A Figura 5a apresenta o *PT* do TCSA, mensal e no período de um ano, instalado na profundidade de 1,00 m, enquanto que a Fig. 5b mostra o *PT* do TCSA na profundidade de 2,00 m. É possível notar que na profundidade de 2,00 m se deu o maior desempenho térmico tanto para aquecimento, quanto para resfriamento, sendo, respectivamente, de aproximadamente $3,0^{\circ}\text{C}$ (em junho) e $-7,75^{\circ}\text{C}$ (em dezembro). Nesse caso, evidentemente foi constatado que o solo argiloso proporcionou melhor troca de calor com o ar no interior do duto devido ao aumento da difusividade térmica no solo P-02 (argila saturada), bem como seguido do aumento da profundidade de instalação do duto.

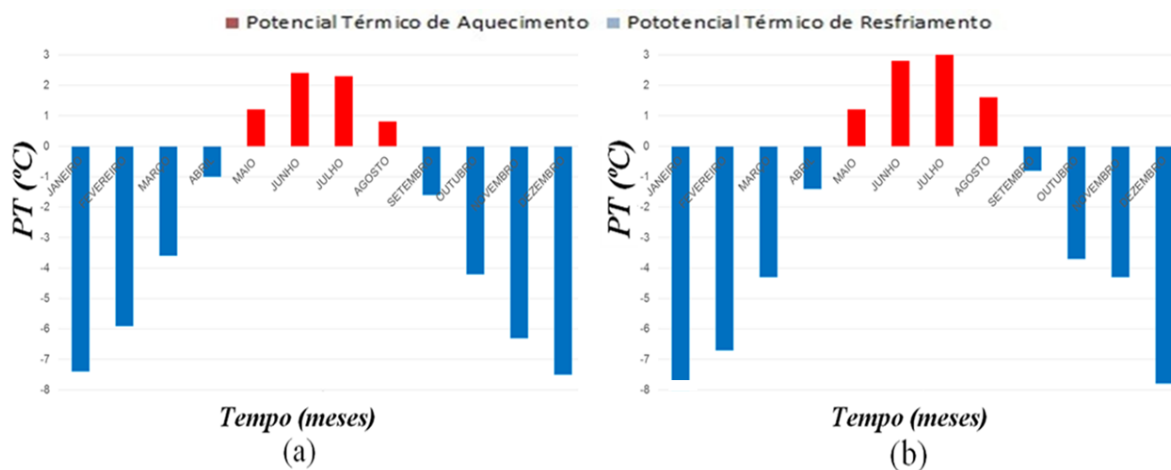


Figura 5: *PT* do TCSA ao longo do ano no solo P-02: na profundidade de 1,00 m (a) e na profundidade de 2,00 m (b).

Nas Figuras 6a e 6b um comportamento análogo foi novamente observado em relação à variação do *PT* mensal do TCSA para as profundidades de instalação de 3,00 m e 4,00 m. Dessa forma, não houve significativa variação do *PT* do TCSA instalado no solo P-02, para os meses em que ocorreram os melhores potenciais de aquecimento e resfriamento, sendo, respectivamente, de aproximadamente 2,0°C (em junho) e -4,80°C (em dezembro), na profundidade de 3,00 m. Notoriamente, o aumento da profundidade não propiciou o aumento do *PT* do TCSA. A difusividade térmica na areia saturada é menor do que na argila saturada, fato que amortiza a troca térmica entre o solo e o ar no interior do duto, fazendo com que a energia térmica que deixou de ser trocada não fosse possível de ser compensada, mesmo com o ganho de profundidade experimentando pelo duto.

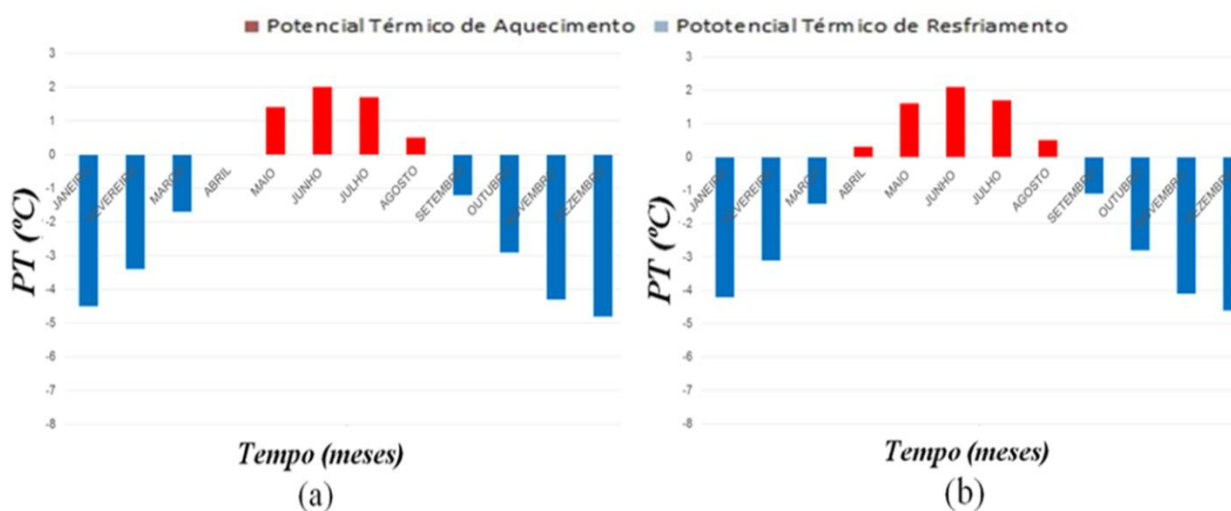


Figura 6: *PT* do TCSA ao longo do ano no solo do P-02: na profundidade de 3,00 m (a) e na profundidade de 4,00 m (b).

CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizado um estudo numérico do *PT* de um TCSA em dois diferentes tipos de solo encontrados no município de Rio Grande.

Foi constatado que o TCSA, quando instalado em solo com característica argilosa, apresenta um melhor desempenho térmico se comparado a uma instalação em solo arenoso. Também foi visualizado que nem sempre o potencial de resfriamento e aquecimento do TCSA aumenta com a profundidade de instalação do duto. O perfil geotécnico do solo tem influência fundamental no desempenho do TCSA, sendo necessário considerar suas características constitutivas e suas propriedades termofísicas para um projeto adequado deste dispositivo. Além disso, fica evidente a importância da utilização da modelagem computacional nesse tipo de problema.

Além disso, foi identificado que a presença de água influencia na propriedade de difusividade térmica do solo, fato que dificulta a troca de calor entre o solo e o ar que escoar no interior do duto. Isso pode levar à redução do *PT* do TCSA mesmo para maiores valores de profundidade da instalação do duto.

A partir dos resultados obtidos é possível recomendar a instalação de TCSA para melhorar a condição térmica de ambientes construídos no município de Rio Grande, especialmente para os períodos quentes em solos argilosos.

São propostas de continuidade deste trabalho: avaliar a influência de parâmetros construtivos como, por exemplo, o diâmetro e o comprimento do duto; avaliar a influência de parâmetros operacionais do TCSA como, por exemplo, a velocidade de escoamento do ar; avaliar o *PT* do TCSA em outros solos existentes no município de Rio Grande e avaliar o real ganho econômico em energia ao utilizar o TCSA.

AGRADECIMENTOS

L. A. Isoldi agradece ao CNPq pelo Projeto Universal (processo: 445558/2014-8). E. D. dos Santos, L. A. Isoldi e L. A. O. Rocha agradecem ao CNPq por suas bolsas de Produtividade em Pesquisa. Os autores agradecem à FURG, à Pró-Reitoria de Infraestrutura (PROINFRA) e à Escola de Engenharia (EE), na pessoa do Prof. Ernesto Luiz Gomes Alquati, pela disponibilização dos ensaios SPT.

REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Análise Granulométrico – Rochas e Solos. NBR 6502, 1995.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Execução de sondagens de simples reconhecimento de solo – NBR 6484, 2001.

ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Chapter 11: District Heating and Cooling. Systems and Equipment Handbook (SI).Atlanta, Georgia, US, 2000.

BHARADWAJ, S.; BANSAL, N. Temperature distribution inside ground for various surface conditions. **Building and Environment**, vol. 16, p. 183–192, 1981.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BRAJA, M.. **Fundamentos da Engenharia Geotécnica**; São Paulo: Thomson Learning, 2006.

BRUM, R. S.; ROCHA, L. A. O.; ISOLDI, L. A.; RODRIGUES, M. K.; DOS SANTOS, E. D.; VAZ, J. On the constructal design of an earth-air heat exchanger with triangular arrangement. **15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT)**, 2014.

BRUM, R. S.; VAZ, J.; ROCHA, L. A. O.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A. A New Computational Modeling to Predict the Behavior of Earth-Air Heat Exchangers. **Energy and Buildings**, vol. 64, p. 395-402, 2013.

BRUM, R. S.; ROCHA, L. A. O.; VAZ, J.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. Development of Simplified Numerical Model for Evaluation of the Influence of Soil-Air Heat Exchanger Installation Depth over its Thermal Potential. **International Journal of Advanced Renewable Energy Research**, vol. 1, p. 505-514, 2012.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**, vol. 3. 6^a ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1989.

DO, S.; BALTAZAR, J.; HABERL, J. Potential cooling savings from a ground-coupled return-air duct system for residential buildings in hot and humid climates. **Energy and Buildings**, Vol. 103, p. 206-215, 2015.

EXCEL (versão 2010) Documentation Manual, 2010.

FERRAZ, J. G.; NUNES, B. R.; RODRIGUES, M. K.; R. S. BRUM; SOUZA, J. A. 1, ROCHA, L. A. O.; ISOLDI, L. A.; SANTOS, E. D. DOS. Modelagem computacional de um trocador de calor solo-ar empregando diferentes modelagens para turbulência. **Scientia Plena**, Vol. 11, n. 8, 2015.

FERRAZ, J. **Modelagem computacional de trocador de calor solo-ar comparando diferentes modelagens para a turbulência**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (PPGMC), 2015.

FLUENT (versão 6.3.26), Documentation Manual, 2007.

GAMBIT (versão 2.4.6), Documentation Manual, 2006.

GAN, G. Simulation of dynamic interactions of the earth–air heat exchanger with soil and atmosphere for preheating of ventilation air. **Applied Energy**, Vol. 158, pp. 118–132, 2015.

GIVONI, B.; KATZ, L. Earth temperatures and underground buildings. **Energy and Buildings**, vol. 8, p. 15 – 25, 1985.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. LTC, Rio de Janeiro, 2011.

ISOLDI, L. A.; BRUM, R. S.; RODRIGUES, M. K.; RAMALHO, J. V. A.; VAZ, J.; SOUSA, J. A.; DOS SANTOS, E. D.; L. A. O. ROCHA, Constructal Design of Earth- Air Heat Exchangers. **Constructal Law Conference**, Proceedings of Constructal Law Conference, Nanjing, vol. 1, p. 88-96, 2013.

JACOVIDES, C. P.; MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURES, M.; LEWIS, J. O. On the ground temperature profile for passive cooling applications in buildings, **Solar Energy**, vol. 48, nº.3, p. 167–175, 1996.

KAUSHALA, M.; DHIMANA, P.; SINGHA, S.; PATELBA, H. Finite volume and response surface methodology based performance prediction and optimization of a hybrid earth to air tunnel heat exchanger. **Energy and Buildings**, vol. 104, p. 25-35, 2015.

MALISKA, C. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., Rio de Janeiro, 2004, 453 p.

MARZAROTTO, C.; NUNES, B.; RODRIGUES, M. K.; SOUZA, J. A.; ROCHA, L. A. O.; BRUM, R. S.; DOS SANTOS E. D.; ISOLDI, L., A. Análise numérica da influência de parâmetros operacionais e construtivos no funcionamento de trocadores de calor solo-ar. **Scientia Plena**, Vol. 11, n. 8, 2015.

MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURES, M.; ASIMAKOPOULOS, D. N. Modeling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers. **Solar Energy**, vol. 53, n. 3, p. 301–305, 1994.

MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURES, M.; ASIMAKOPOULOS, D. N.; ARGIRIOU, A. On the ground temperature below buildings. **Solar Energy**, vol. 55, n.5, p. 355 – 362, 1995.

MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURES, M.; LEWIS, J. O.; ASIMAKOPOULOS, D. N. On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles, **Solar Energy**, vol. 60, p. 181–190, 1997.

NUNES, B. R.; FERRAZ, J. G.; KIPPER, R.; RODRIGUES, M. K.; BRUM, R. S.; SOUZA, J.; ROCHA, L. A. O.; E. D. DOS SANTOS; L. A. ISOLDI. Modelagem computacional aplicada

ao estudo de um trocador de calor solo-ar com diferentes configurações geométricas. **Scientia Plena**, Vol. 11, n. 8, 2015.

NUNES, B., 2015. **Modelagem computacional aplicada ao estudo de trocadores de calor solo-ar com configuração geométrica complexa**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (PPGMC), 2015.

PATANKAR, S. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. McGraw-hill, New York, USA, 1980.

RODRIGUES, M. K.; BRUM, R. S.; VAZ, J.; SOUZA, J.; ROCHA, L. A. O.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A. Modelagem computacional e método Constructal Design aplicado à melhora do desempenho térmico de uma instalação de trocador de calor solo-ar. **XXXVI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE)**, 2014.

RODRIGUES, M. K.; BRUM, R.; VAZ, J.; ROCHA, L.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. Numerical investigation about the improvement of the thermal potential of an Earth-Air Heat Exchanger (EAHE) employing the Constructal Design method. **Renewable Energy**, v. 80, p. 538-551, 2015c.

RODRIGUES, M. K.; SOUZA, J.; VAZ, J.; JUNIOR, I. C. A.; ROCHA, L. A. O.; BRUM, R. S.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A. Estudo numérico da influência de condições de contorno na modelagem computacional de trocador de calor solo-ar. **Scientia Plena**, Vol. 11, n. 8, 2015b.

RODRIGUES, M., K.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A. **Numerical Analysis and Constructal Design of Earth-Air Heat Exchanger - Mathematical Methods for Engineering**, 1.ed. Saarbrücken: Lap Lambert Academic Publishing, v. 1, 2015a, 167p.

SANTAMOURIS, M.; MIHALAKAKOU, G.; ARGIRIOU, A.; ASIMAKOPOULOS, D. N. On the performance of buildings coupled with earth to air heat exchangers. **Solar Energy**, vol. 54, n. 6, p. 375–380, 1995.

VAZ, J. **Estudo experimental e numérico sobre o uso do solo como reservatório de energia para o aquecimento e resfriamento de ambientes edificadas**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Porto Alegre, RS, Brasil, 2011.

VAZ, J.; SATTLER, M. A.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A. Experimental and Numerical Analysis of an Earth–Air Heat Exchanger. **Energy and Buildings**, vol. 43, p. 2476-2482, 2011.

VAZ, J.; SATTLER, M. A.; BRUM, R. S.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L., A. An experimental study on the use of earth-Air heat exchangers (EAHE). **Energy and Buildings**, n. 72, p. 122- 131, 2014.

VERSTEEG, H.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. England, Pearson Education Limited, 2^a ed., 2007, 503 p.

WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling For CFD**. Dcw Industries, USA, 2002.