

ENSAIOS PARA MEDIÇÃO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM AREIAS: ASPETOS DE MODELAÇÃO NUMÉRICA

Ana Vieira¹, Carlos Pereira², Kamar Aljundi³ e João Maranha⁴

Departamento de Geotecnia; Laboratório Nacional de Engenharia Civil
¹avieira@lnec.pt, ²cpereira@lnec.pt, ³kaljundi@lnec.pt, ⁴jmaranha@lnec.pt

Resumo. A avaliação das propriedades térmicas dos solos, em especial da sua condutividade térmica, tem assumido uma importância crescente, sendo essencial para o dimensionamento de sistemas geotérmicos superficiais. Apresentam-se neste trabalho, alguns aspetos de um estudo relativo à medição e modelação de ensaios de condutividade térmica em amostras de solo, conduzidos em regime transitório.

Palavras-chave: ensaios em solos, condutividade térmica, regime transitório, modelação numérica.

1. CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE SOLOS

Com a crescente utilização dos solos como meio de extração e armazenamento de calor, por via da utilização de sistemas geotérmicos superficiais, a determinação das suas propriedades térmicas tem-se tornado alvo de um crescente interesse, tendo em vista o dimensionamento de sistemas eficientes [1], destacando-se, em especial nos sistemas em circuito fechado, a condutividade térmica. Segundo a Lei de Fourier, a condutividade térmica, λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), propriedade física da matéria que mede a sua capacidade de conduzir calor, representa o coeficiente de proporcionalidade entre o gradiente de temperatura ∇T ($\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$) e o fluxo de calor q ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), de acordo com:

$$q = \lambda \nabla T \quad (1)$$

Numerosos fatores afetam a condutividade térmica do solo, entre os quais se destaca o seu grau de saturação. Têm também um significativo impacto neste parâmetro, o índice de vazios do solo, a sua composição mineralógica e o seu arranjo espacial, entre outros fatores [1].

A determinação da condutividade térmica pode ser efetuada por diferentes vias, como a empírica, semi-empírica ou experimental. Do ponto de vista experimental, pode ser determinada por via laboratorial ou por ensaios de campo. Os primeiros são menos dispendiosos e geralmente mais rápidos do que os segundos. No entanto, não têm em conta condições específicas do local onde será instalado o sistema, como por exemplo, a heterogeneidade espacial, a eventual presença de fluxo de águas subterrâneas, o estado de tensão in situ, entre outros. Têm, porém, a vantagem de permitir efetuar medições sistemáticas sobre condições de ensaio controladas, permitindo assim estudar a influência das diferentes variáveis na condutividade térmica. Em laboratório, as medições de λ podem ser efetuadas em regime permanente ou transitório: no primeiro caso estabelece-se um fluxo térmico no qual a temperatura não muda ao longo do tempo. Tem-se constatado que diversos fatores afetam as medições em laboratório e no campo, observando-se diversas discrepâncias entre valores obtidos por diferentes vias [2].

São aqui apresentados alguns resultados de ensaios de laboratório efetuados numa areia de referência e discutidos alguns aspetos referentes à modelação numérica destes ensaios. Ambos fazem parte de um estudo mais amplo referente à determinação da condutividade térmica em solos.

2. MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM REGIME TRANSITÓRIO

Aljundi et al. [3] estudaram a condutividade térmica da areia de *Fontainebleau* com recurso a uma sonda térmica concebida para realizar medições de elevada precisão em regime transitório. O método de ensaio seguido baseou-se nas normas da ATSM D5334-00 e da ICE. De acordo com este método é introduzida uma sonda térmica (*thermal needle*) numa amostra de solo idealizando um fluxo de calor de uma fonte linear (*hot wire*) de comprimento infinito e diâmetro infinitesimal, permitindo assim utilizar a solução proposta por Carslaw e Jaeger [4], usualmente designada por *Line source solution*. Com base nesta solução, seguindo algumas simplificações, λ pode ser estimado através do aumento de temperatura de T_2 para T_1 entre os correspondentes instantes t_2 e t_1 , através de:

$$\lambda = Q / (4\pi(T_2 - T_1) \cdot \ln(t_2/t_1)) \quad (2)$$

onde Q é o fluxo térmico por unidade de comprimento. Os instantes de tempo devem ser definidos após a fase de aquecimento, como os limites do intervalo de tempo em que a diferença de temperatura normalizada $4\pi(T_2 - T_1)/Q$ versus o logaritmo natural do intervalo de tempo é aproximadamente linear, isto é, a derivada da temperatura em relação a $\ln(t)$ é constante. Nestas circunstâncias, λ é o inverso do declive desta linha.

3. VARIÁVEIS QUE AFETAM A CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Com recurso à sonda térmica realizaram-se uma série de ensaios em amostras preparadas em laboratório sob diferentes graus de compactação, em condições de saturação total e nula. Os pormenores dos ensaio e preparação das amostras podem ser consultados em [3]. Foram também testados a duração do ensaio e a temperatura a que foram realizados, a qual foi devidamente controlada numa câmara climática. Os resultados

obtidos permitiram confirmar a elevada dependência do grau de saturação da amostra. Revelaram também uma dependência de λ dos parâmetros de ensaio, nomeadamente, da temperatura, do fluxo de calor, da densidade da amostra e do tempo de duração dos ensaio. Alguns resultados estão representados na Figura 1.

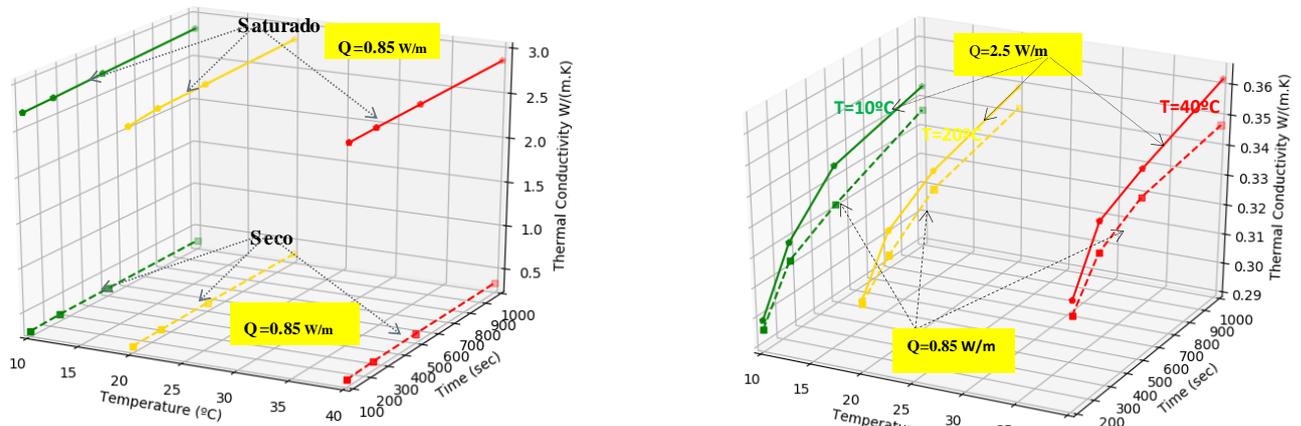


Figura 1. Efeito do tempo, do fluxo de calor e da temperatura (areia seca e saturada) (adaptado de [3]).

Adicionalmente, as análises numéricas, realizadas utilizando o programa de diferenças finitas FLAC, permitiram observar que a determinação de λ pode ser afetada pela dimensão do provete. A Figura 2 (à esquerda) representa a evolução da temperatura na face interior do provete com a duração do ensaio, para dois provetes com diferentes dimensões. Para tempos de ensaio elevados, o efeito da proximidade da fronteira exterior começa a limitar o incremento de temperatura do provete mais estreito, ao contrário do provete de maiores dimensões que, para esta escala temporal, se continua a comportar com um meio semi-infinito. Como se pode observar na Figura 2 (à direita), a proximidade da fronteira diminui de forma significativa o intervalo de tempo para o qual se obtém o valor correto de λ , correspondente ao intervalo com derivada da temperatura em relação a $\ln(t)$ constante.

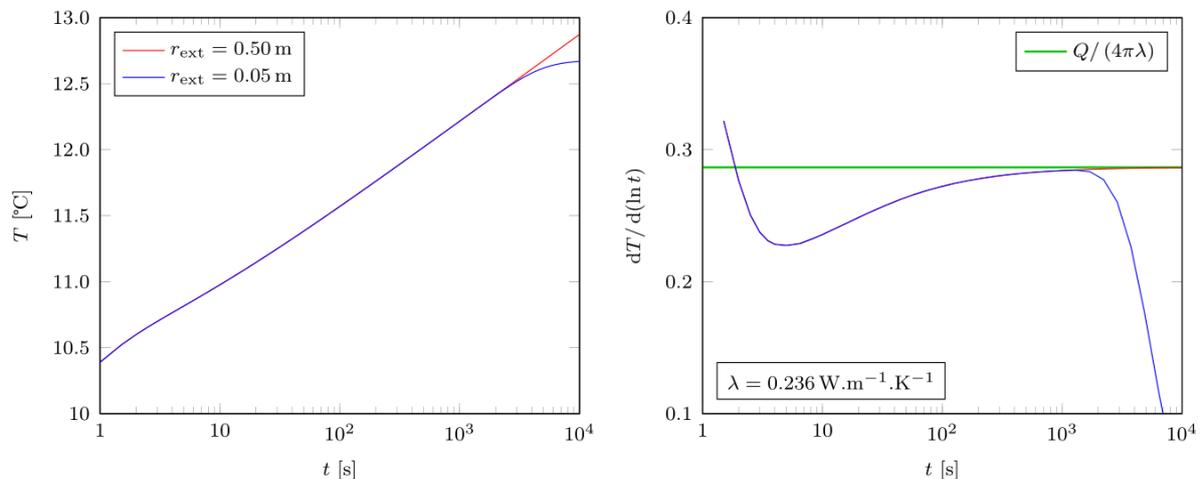


Figura 2. Efeito da dimensão do provete nos valores de condutividade térmica determinados.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia, FCT, pelo financiamento concedido através do projeto Geosustained, referência PTDC/ECI-CON/1866/2021.

REFERÊNCIAS

- [1] Vieira, A., et al. (2017). Characterisation of ground thermal and thermo-mechanical behaviour for shallow geothermal energy applications. *Energies*, 10(12), 2044; doi.org/10.3390/en10122044.
- [2] Low, J.E., Loveridge, F.A., Powrie, W., Nicholson, D. (2014). A comparison of laboratory and in situ methods to determine soil thermal conductivity for energy foundations and other ground heat exchanger applications. *Acta Geotechnica* 10, 209–218; doi:10.1007/s11440-014-0333-0.
- [3] Aljundi, K., Vieira, A., Maranhã, J., Lapa, J., Cardoso, R. (2020). Effects of temperature, test duration and heat flux in thermal conductivity measurements under transient conditions in dry and fully saturated states. *E3S Web of Conferences* 195, 04007; doi:10.1051/e3sconf/202019504007.
- [4] Carslaw, H.S., Jaeger, J.C. (1959). *Conduction of Heat in Solids*. Oxford Science Publications.