

# COMPORTAMENTO TÉRMICO DO SOLO: ESTUDO EXPERIMENTAL PELO HOT WIRE METHOD E APLICAÇÃO NUMÉRICA

## Soil thermal behaviour: Characterization by the Hot Wire Method and numerical application

Henrique Lopes<sup>a</sup>, Ana Vieira<sup>b</sup>, Sofia Soares<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal.

<sup>b</sup> Departamento de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal

<sup>c</sup> Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Beja, Portugal.

**RESUMO** – A crescente preocupação revelada pelas sociedades no que respeita à sustentabilidade energética do planeta, tornou-se o principal impulsionador para o desenvolvimento de formas de exploração de energia que contribuam para a redução dos gases com efeito de estufa. Os sistemas geotérmicos de baixa entalpia são hoje uma das tecnologias que utiliza recursos renováveis para climatização com maior crescimento em toda a Europa. O seu princípio base está associado à utilização do solo como fonte e dissipador de calor. O estudo dos mecanismos de transferência de calor e das propriedades térmicas do solo é determinante para avaliar a sua resposta como permutador de calor, e assim dimensionar e projetar sistemas mais eficientes. No âmbito de um trabalho de dissertação de mestrado relativo a Sistemas Geotérmicos de Baixa Entalpia, apresentam-se neste artigo alguns resultados relativos à caracterização térmica de um solo arenoso e parte das análises numéricas conduzidas relativas à interação térmica solo-estaca (transferência por condução). No âmbito do trabalho de laboratório foi concebido um sistema para medição da condutividade térmica de uma areia seca pelo *Hot Wire Method*, analisando-se entre outros, aspetos, a influência do índice de vazios na condutividade. As análises numéricas, que incluem apenas o processo de transferência de calor por condução, visam essencialmente, apresentar as principais variáveis envolvidas no funcionamento de uma estaca termoativa para condições de saturação nula e total e possíveis gamas de alteração de temperaturas.

**ABSTRACT** – The rising concern revealed by society in the last years, regarding the energetic sustainability of the planet, has become the main driver for the development of new techniques to explore energy that contribute to a decrease in greenhouse gases emission. The Ground Source Energy Systems are currently one of the most applied renewables technologies used for heating and cooling all over Europe, with its basic principle laying in the consideration of the soil as a heat source or sink. The study of the thermal transfer mechanisms and thermal properties that characterize the soil thermal behavior are therefore crucial in the evaluation and design of more efficient systems. This work presents the thermal characterization of a sandy soil and a set of numerical analysis relative to the thermal soil-pile foundation interaction. The laboratory work consists on a series of thermal conduction tests by carried out in an apparatus conceived for that purpose. The results interpretation is based on the *Hot Wire Method*. The influence of factors such as the void ratio on the thermal conductivity is analysed. The numerical analyses, only taking into account heat conduction, has the main purpose of presenting the main variables involved in a thermoactive pile operation for dry and totally saturated conditions as well as the possible temperature range involved.

**Palavras Chave** – Caracterização térmica de solos, *Hot Wire Method*, modelação numérica.

**Keywords** – Soil thermal characterization, Hot Wire Method, numerical modelling.

---

E-mails: hl.lopes@campus.fct.unl.pt (H. Lopes), avieira@lnec.pt (A. Vieira), sofia.soares@ipbeja.com (S. Soares)

## 1 – INTRODUÇÃO

A caracterização térmica de solos é necessária para diversas aplicações em diferentes domínios específicos da Engenharia Civil, nomeadamente na construção de rodovias, *pipelines*, cabos elétricos enterrados e vários outros tipos de estruturas e infraestruturas (Farouki, 1981). Para além destas aplicações, o estudo das propriedades térmicas dos solos ocupa lugar de destaque em áreas como a geologia, agronomia e meteorologia. Mais recentemente, esta temática tem encontrado espaço no domínio dos recursos geotérmicos de baixa entalpia, em particular no seu aproveitamento para climatização através de Sistemas Geotérmicos de Baixa Entalpia (*Ground Source Energy Systems*), especialmente naqueles que utilizam bombas de calor (*Ground Source Heat Pump Systems*–GSHP). No início dos anos 80 estes sistemas foram pela primeira vez utilizados em estruturas de fundação para captação e injeção de calor no solo. Deste modo, acrescentou-se aos elementos de betão, além da função estrutural, a de permutador de calor com o solo. A Suíça e Áustria foram os países pioneiros onde se iniciou a exploração através de lajes de fundo. Em 1984 o princípio de estrutura termoativa ou geotermoativa começou a ser utilizado em estacas, tendo em 1996 sido alargado às paredes moldadas, verificando-se daí em diante um crescimento significativo na sua utilização (Brandl, 2006). Os *Ground Source Energy Systems* são hoje aplicados em habitações uni e multifamiliares, escritórios de grande e pequena dimensão, infraestruturas subterrâneas, de que são exemplo estações de metropolitano (Lund *et al.*, 2011), no domínio da agropecuária, para climatização de estufas ou aviários, nas pescas, em unidades de piscicultura e no sector industrial dos têxteis e do vinho (Madureira e Antunes, 2012).

De entre os sistemas geotérmicos superficiais, aqueles que utilizam estruturas de fundação termoativas tem apresentado grande desenvolvimento em toda a Europa, prevendo-se a sua crescente e generalizada utilização no futuro. Como exemplos paradigmáticos de utilização desta tecnologia para climatização, refere-se terminal E do Aeroporto Internacional de Zurique, a estação *Taborstraße*, linha U2 do metro de Viena (Adam e Markiewicz, 2009), ou o *Swiss Federal Institute of Technology* em Lausanne (Pahud e Hubbuch, 2007). Em Portugal a utilização de estruturas de fundação como permutadores de calor é praticamente inexistente, todavia destacam-se os aproveitamentos existentes em alguns edifícios pertencentes à Universidade de Aveiro.

No presente trabalho apresentam-se parte dos resultados obtidos por Lopes (2014) no âmbito da sua Dissertação de Mestrado, na qual se pretendeu caracterizar em primeira análise uma amostra de solo arenosa, de natureza siliciosa, para, num segundo plano, se proceder à modelação numérica do seu comportamento térmico para dois cenários distintos. Um, onde se estudou a influência isolada da variação anual de temperatura, e outro onde se simulou o carregamento térmico anterior associado ao carregamento imposto por uma estrutura termoativa de fundação.

## 2 – MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO

O solo é um sistema multifásico constituído por um conjunto de partículas sólidas de diferentes formas e tamanhos, cujos vazios são ocupados por ar e água. As suas propriedades térmicas são por isso dependentes da água e ar que preenche os seus vazios, e das diferentes partículas que constituem a fase sólida.

Segundo Farouki (1981), Hillel (1998), Brandl (2006), Banks (2012) e Laloui e Di Donna (2013), as propriedades térmicas dos solos e o seu respetivo comportamento térmico são função dos índices base do solo como sejam, a sua massa volúmica ( $\rho$ ), peso volúmico ( $\gamma$ ), teor em água ( $w$ ), grau de saturação ( $S_r$ ), porosidade ( $n$ ) e ainda da sua composição mineralógica, dimensão dos grãos e arranjo espacial das partículas.

Ao ser estabelecido um gradiente de temperatura, a transferência de calor nestes materiais ocorrerá isolada ou conjuntamente por condução, convecção, radiação, vaporização-condensação, trocas iónicas e congelação-descongelação (Brandl, 2006; Rees *et al.* 2000). O processo de

transferência de energia térmica verificar-se-á até que o gradiente térmico em todos os pontos seja nulo, altura em que o sistema atingirá um estado de equilíbrio.

A importância relativa de cada um dos mecanismos não é igual no sistema Terra. Autores como Lowrie (2007) e Williams e Smith (1989) consideram a condução como o mecanismo mais proeminente na crosta terrestre, realidade válida também para os solos que dela fazem parte (Brandl, 2006 e Rees *et al.*, 2000). Para Brandl (2006) a importância da condução nos solos é tal que os restantes mecanismos de transferência podem ser desprezados, caso a dimensão das partículas que o constituem e os seus espaços intersticiais sejam de dimensão reduzida relativamente ao volume total em análise.

Considerando apenas a transferência de energia térmica por condução, dois regimes térmicos podem ser considerados. Um, designado como permanente ou estacionário, e outro denominado variável ou transitório. O primeiro ocorre quando num determinado ponto não existe variação de temperatura no tempo. No segundo caso, para um dado ponto, existe variação de temperatura à medida que a transferência de calor decorre. A transferência de calor por condução é a mais comum na natureza (Çengel, 2003) e por isso também nos solos. Pode ser simplificada caracterizada através de três propriedades térmicas: a condutividade térmica ( $\lambda$ ), o calor específico ( $c$ ) e a difusividade térmica ( $\alpha$ ), esta última definida como o quociente entre a condutividade térmica e o produto entre a massa volúmica e o calor específico, ou seja  $\alpha = \lambda / (c \cdot \rho)$

Estas propriedades térmicas sofrem variações face à variação de alguns índices físicos. Qualquer solo, com um dado índice de vazios, sofre um incremento na sua condutividade térmica e calor específico face a uma variação positiva de teor em água ou grau de saturação. Tal comportamento é resultado da substituição do ar existente nos poros por água, em virtude do contraste significativo entre as propriedades térmicas dos dois materiais (Quadro 1). Também a redução do índice de vazios, ou seja, o aumento do peso volúmico do solo, resulta em regra num aumento da condutividade térmica. A redução daquele índice físico conduz necessariamente ao aumento da quantidade de partículas sólidas por unidade de volume, isto é, verifica-se a substituição do ar ou água constituinte dos espaços intersticiais por material sólido com condutividade superior. Sob o ponto de vista térmico o solo observa um acréscimo e melhoria dos contactos entre partículas sólidas, contactos sólido-sólido, permitindo assim, segundo autores como Farouki (1981) e Hillel (1998), uma maior eficácia na transferência de calor por condução.

**Quadro 1 - Propriedades térmicas de algumas substâncias**

Substância	Condutividade térmica ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	Calor específico ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
Água	0,613 <sup>c)</sup>	4186 <sup>a)</sup>
Ar	0,026 <sup>e)</sup>	1012 <sup>b)</sup>
Gelo	1,7 – 2,0 <sup>d)</sup>	1884 <sup>b)</sup>

*a) Segundo Rees et al. (2000), b) Segundo Vieira e Maranhã (2012), c) Segundo Çengel (2003), d) Segundo Banks (2012)*

Ainda que a condução seja o processo de transferência de calor dominante nos solos e o que mais influencia o desempenho de estruturas termoativas é importante, em casos particulares, considerar as condições hidrogeológicas ocorrentes, como seja a existência de um fluxo de água subterrânea de considerável dimensão, já que este pode funcionar como fluido de transporte de energia térmica (funcionando como dissipador) ou mesmo a existência de fenómenos de transferência de calor por convecção ao nível da água que preenche os interstícios do solo.

### 3 – CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DE UM SOLO ARENOSO

A caracterização térmica dos solos pode ser obtida através de ensaios de laboratório, ensaios *in situ* e métodos empíricos. Uma descrição pormenorizada dos métodos mais utilizados para o referido fim pode ser encontrada em Lopes (2014). Muitos outros trabalhos podem ser encontrados na

bibliografia onde se referem várias vias de determinação para a caracterização térmica de solos (e.g. Nikolaev et al., 2013; Low et al., 2015).

No presente trabalho optou-se pela utilização de um procedimento de ensaio laboratorial baseado no *Hot Wire Method* (HWM) (Healy et al., 1976). Trata-se de um método amplamente utilizado para a caracterização térmica de sólidos, líquidos, gases e materiais particulados. A sua aplicabilidade em solos é referida em trabalhos como Brandl (2006) e Merckx et al. (2012). Nesta secção, serão apresentados de forma sucinta os fundamentos teóricos do método de ensaio e todo o trabalho de caracterização térmica realizado.

### 3.1 – Método e procedimento de ensaio

O procedimento utilizado, como referido anteriormente, tem por base o *Hot Wire Method*, cujo fundamento teórico é sustentado pelo *Line Source Model*. Este modelo considera uma fonte de calor de extensão infinita e diâmetro infinitamente pequeno, introduzida num meio infinito homogéneo e isotrópico.

Para a aplicação desta metodologia na determinação da condutividade térmica é considerado um provete cilíndrico, cuja relação altura-diâmetro é suficientemente grande para que possam ser desprezados os efeitos de fronteira. O material que constitui o provete a ensaiar é considerado homogéneo e isotrópico e com propriedades térmicas constantes no tempo.

Segundo Carslaw e Jaeger (1959) e Franco (2007) em regime variável e para um período de aquecimento suficientemente grande, a temperatura num dado ponto à distância ( $r_a$ ) da fonte de calor pode ser determinada através da equação:

$$T(r_a, t) = \frac{\dot{Q}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l_a} \cdot \left[ \ln \left( \frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r_a^2} \right) + \frac{r_a^2}{4 \cdot \alpha \cdot t} - \frac{1}{4} \cdot \frac{r_a^2}{4 \cdot \alpha \cdot t} - \dots - \gamma \right] \quad (1)$$

onde  $t$  é o tempo em (s),  $\dot{Q}$  a potência dissipada como calor pela unidade de aquecimento em (W),  $\gamma$  constante de Euler e  $l_a$  o comprimento da unidade de aquecimento. Caso se verifique que  $(r_a^2/4 \cdot \alpha \cdot t) \ll 1 \ll 1$  a equação 1 pode ser reescrita de forma simplificada como se apresenta na equação:

$$T(r_a, t) = \frac{\dot{Q}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l_a} \cdot \left[ \ln t + \ln \left( \frac{4 \cdot \alpha}{r_a^2} \right) - \gamma \right] \quad (2)$$

A diferença de temperatura entre dois instantes  $t_1$  e  $t_2$  descrita pela equação:

$$T(t_2) - T(t_1) = \frac{\dot{Q}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l_a} \cdot \ln \left( \frac{t_2}{t_1} \right) \quad (3)$$

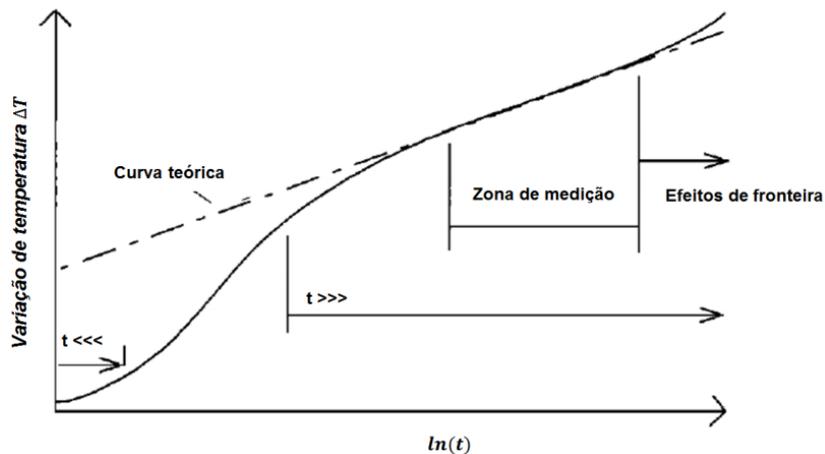
permite a determinação da condutividade térmica do material em análise. Para isso é necessário realizar leituras periódicas de temperatura que são registadas num gráfico semi-logarítmico como o apresentado na Figura 1. No eixo das ordenadas são colocados os valores das medições de diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) e no das abcissas os valores de  $\ln(t)$ .

A condutividade térmica é então obtida resolvendo a equação 3 em ordem a  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{4 \cdot \pi \cdot \Delta T \cdot l_a} \cdot \ln \left( \frac{t_2}{t_1} \right) \quad (4)$$

A equação 4 pode então ser reescrita substituindo  $\ln \frac{(t_2/t_1) \ln(t_2/t_1)}{\Delta T}$  por  $1/S$ , sendo  $S$  o declive da reta de ajuste por regressão linear dos pontos que constituem a zona de medição, resultando:

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{4 \cdot \pi \cdot l_a} \cdot \frac{1}{S} \quad (5)$$



**Fig. 1** – Gráfico Típico de um Ensaio pelo *Hot Wire Method*, adaptado de Presley e Christensen (1997)

O declive  $S$  a utilizar na equação 5 deve ser obtido através do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), devendo o ajuste por regressão linear simples ser realizado na zona de medição (Figura 1).

A reta de regressão a utilizar deve ser aquela onde se observe maior linearidade ao nível da curva experimental. A seleção da reta de regressão é feita através da realização de sucessivos ajustes por regressão linear simples, selecionando-se aquela cujo valor de  $R^2$  seja maior.

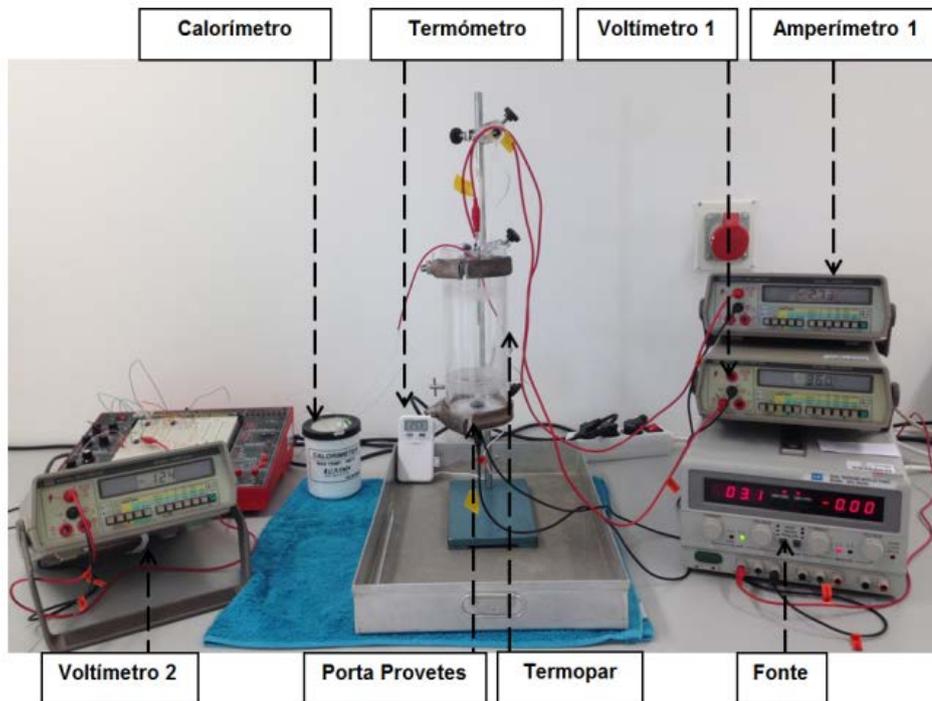
A potência dissipada é determinada através da Lei de Joule, multiplicando a intensidade de corrente pela diferença de potencial nos terminais da unidade de aquecimento. A aplicação desta metodologia requer que durante os ensaios ambas as propriedades elétricas se mantenham sensivelmente constantes.

### 3.2 – Dispositivo utilizado

O sistema de ensaio utilizado apresenta-se na Figura 2. Inclui uma fonte de calor linear de *Constantan*, um termopar do tipo *T*, cobre-*Constantan*, um termómetro, uma câmara de ensaio, uma fonte de energia e três multímetros.

Os multímetros permitem a monitorização da intensidade de corrente fornecida pela fonte de energia (Amperímetro), da diferença de potencial estabelecida entre os extremos da fonte de calor (Voltímetro 1) e da diferença de potencial existente entre os dois extremos do termopar (Voltímetro 2). A câmara de ensaio encontra-se suspensa através da utilização de um suporte universal com o qual é possível também manter a sua verticalidade.

A montagem é simples, sendo, no entanto, fundamental assegurar bons contactos entre todos os fios existentes no circuito para que não ocorram, ou sejam mínimas, as oscilações na intensidade de corrente, resistência elétrica e na potência dissipada  $\dot{Q}$ . Por forma a minimizar estes problemas as



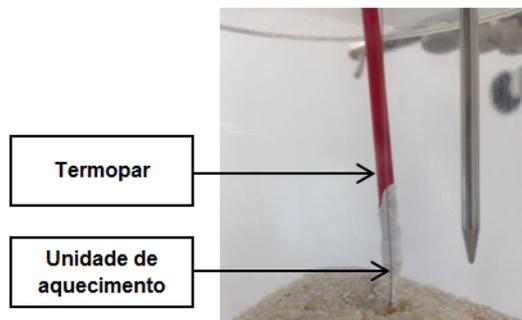
**Fig. 2** – Dispositivo de ensaio montado para determinação da condutividade térmica (Lopes, 2014)

ligações entre os diferentes componentes do equipamento foram soldadas com solda quente de estanho.

A fonte de calor, ou unidade de aquecimento (Figura 3), constitui o componente do dispositivo com a qual é possível gerar calor. O material que a constitui deve apresentar baixa variação na sua resistência elétrica com o aumento de temperatura, por forma a possibilitar a determinação da potência dissipada. Na caracterização térmica realizada optou-se pela utilização de *Constantan*, uma liga metálica de cobre, níquel, manganês e ferro, que apresenta as características adequadas para a função.

A câmara de ensaio constitui o recipiente no interior do qual são colocados os materiais (solos) a ensaiar. Esta deve ser capaz de dissipar para o exterior a energia térmica proveniente da unidade de aquecimento que lhe é transmitida pelo solo. No seu interior, o fluxo de calor deve ser unicamente radial, o que se procura garantir pela utilização de materiais pouco condutores para a selagem do seu topo e base. No estudo apresentado optou-se por uma câmara desenvolvida pelos autores (Lopes, 2014), construída em aço inox e selada no topo e base por borracha sintética, com 6,5 cm de diâmetro e 21 cm de altura, que se mostra nas Figuras 4 e 5.

Os termopares permitem a medição de temperaturas de forma rápida e com precisão considerável. Podem ser de várias tipologias, tendo neste trabalho sido utilizado um tipo *T* composto por dois fios de cobre unidos a um de *Constantan* por enrolamento compacto. Uma das uniões é inserida em gelo fundente (junção de referência) e outra no interior do provete (junção de medição) o mais próximo possível da unidade de aquecimento (Figuras 3 e 5). A leitura da diferença de potencial é realizada utilizando um voltmetro e um circuito eletrónico para amplificação da diferença de potencial medida.



**Fig. 3** – Pormenor do interior do interior da câmara de ensaio, observando-se o termopar e a unidade de aquecimento.



**Fig. 4** – Câmara em aço inoxidável utilizada no presente estudo



**Fig. 5** – Pormenor do interior da camara de ensaio

### 3.3 – Procedimento de ensaio

A realização dos ensaios com recurso ao HWM em solos não se encontra padronizada, existindo, contudo, algumas sugestões de autores no que se refere ao tempo de ensaio. Por forma a garantir os tempos de medição mínimos, optou-se pela fixação do tempo mínimo de ensaio em 3600s (1 hora). O estudo foi realizado em amostras de areia, descrita em 3.4, no estado seco por forma a garantir a invariabilidade deste parâmetro. Antes da realização de qualquer ensaio térmico, procedeu-se à calibração do termopar.

O procedimento de ensaio inicia-se com a secagem do solo na estufa durante 24h, sendo depois colocado no exsiccador até atingir a temperatura ambiente. A introdução do provete a ensaiar no interior da câmara de ensaio é realizada utilizando um funil de vidro, de forma a garantir a integridade da unidade de aquecimento. Durante o preenchimento da câmara são-lhe impressas pequenas vibrações de forma homogénea com o objetivo de reduzir o índice de vazios do material em estudo. O termopar e o termómetro são introduzidos sensivelmente a meia distância entre a base e o topo da unidade de aquecimento. O preenchimento é retomado até que o volume da câmara esteja completo. Finda a colocação do solo é fundamental proceder a uma inspeção visual antes do início de funcionamento do dispositivo, visando a correção da sua verticalidade e a avaliação do estado das ligações. O ensaio é então iniciado ligando a fonte de energia elétrica, devendo a potência descarregada para a unidade de aquecimento ser reduzida para que sejam garantidas pequenas perturbações no campo de temperaturas do provete.

### 3.4 – Caracterização da amostra ensaiada

Através da observação à lupa binocular, marca Olympus modelo SZ-40, a amostra revelou ser uma areia branca, fina a média, com classe de arredondamento entre o sub-arredondado a arredondado (segundo Pettijohn (1948)). É essencialmente constituída por quartzo translúcido a transparente, 75% a 80%, contendo ainda 2% a 5% de grãos de quartzo leitoso e cerca de 15% de grãos de feldspato. Além destas mineralogias, identificaram-se, também, em quantidades diminutas - até cerca de 1% - grãos de moscovite e minerais ferromagnesianos (anfíbolos e/ou piroxenas) (Figura 6).

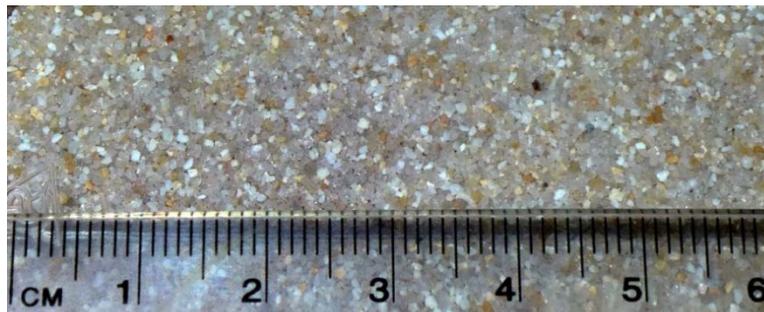


Fig. 6 – Areia siliciosa estudada

A classificação do solo foi realizada tendo por base ensaios de identificação. Estes iniciaram-se com a análise granulométrica por via seca e húmida, de onde se concluiu que o solo é maioritariamente constituído por partículas da dimensão das areias, cerca de 98%. Além desta dimensão, o solo exhibe ainda cerca de 2% de partículas da dimensão dos siltes e/ou argilas. Os coeficientes de curvatura e uniformidade determinados foram de 1,17 e 2,03, respetivamente. Com base nos resultados anteriores o solo foi classificado segundo a Classificação Unificada de Solos como uma areia mal graduada SP.

Determinou-se, ainda, a densidade das partículas sólidas ( $G_s$ ) para a qual se obteve o valor de 2,63. O teor em água foi determinado no final de cada ensaio térmico para confirmação do valor inicial de 0%.

### 3.5 – Resultados e discussão

Os resultados da caracterização térmica apresentam-se no Quadro 2. Para cada um dos ensaios, além da condutividade térmica, foi ainda determinado o índice de vazios, porosidade e peso volúmico. Além destes, expõe-se também o valor de coeficiente de correlação  $R^2$  como indicador da qualidade do ajuste utilizado para a determinação de  $\lambda$ .

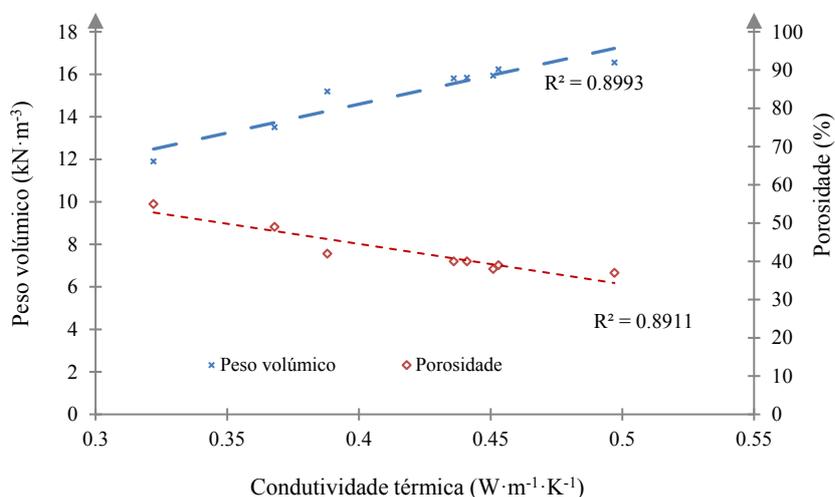
Os ajustes obtidos por regressão linear são válidos, tendo em qualquer caso sido atingido ou superado o valor mínimo requerido de coeficiente de correlação para a regressão linear ( $R^2=0,990$ ). A variação da condutividade térmica, entre  $0,368 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  e  $0,497 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , é consistente com o esperado, ou seja, o incremento do peso volúmico resulta no aumento da condutividade térmica em virtude da permuta de parte do volume de ar por partículas sólidas (Figura 7).

Por forma averiguar a plausibilidade destes resultados, recorreu-se a dados existentes na bibliografia, confrontando-os com os valores obtidos experimentalmente. McCorry e Jones (2011) apresentam valores de condutividade para diferentes tipos de solos e rochas baseados na norma alemã VDI 4640 (2010), relativa ao projeto e dimensionamento de *Ground Source Energy Systems*. Segundo os autores, a condutividade térmica de referência para as areias secas situa-se no intervalo

entre  $0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  e  $0,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , valores estes que englobam todos os resultados determinados e apresentados no Quadro 2.

**Quadro 2** - Resultados obtidos pelo *Hot Wire Method* para a areia estudada

Ensaio	Índice de Vazios ( $e$ )	Porosidade ( $n$ ) (%)	Peso Volúmico ( $\gamma_d$ ) ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Condutividade térmica ( $\lambda$ ) ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	$R^2$
1	0,94	49	13,51	0,368	0,997
2	0,65	38	15,94	0,451	0,996
3	0,65	39	16,24	0,453	0,995
4	1,21	55	11,90	0,322	0,999
5	0,59	37	16,55	0,497	0,998
6	0,66	40	15,81	0,436	0,999
7	0,66	40	15,84	0,441	0,999
8	0,73	42	15,19	0,388	0,999



**Fig. 7** – Relação entre a condutividade térmica e o peso volúmico e porosidade

#### 4 – MODELAÇÃO NUMÉRICA

No âmbito do trabalho desenvolvido em Lopes (2014), foram efetuadas algumas séries de estudos de modelação numérica parte dos quais se apresentam em seguida. Nestes estudos de modelação foi estudado o comportamento térmico de um de solo homogéneo para diferentes cenários, para os quais se fizeram variar: as propriedades dos materiais envolvidos no modelo (estado seco e totalmente saturado), a ação térmica provocada pela variação anual de temperatura à superfície e a presença de uma estaca de fundação termoativa e respetivo carregamento térmico.

O estudo numérico foi dividido em duas fases. Uma primeira, onde se analisou unicamente a resposta do solo e a influência da variação de temperatura à superfície (condição para a qual existe solução analítica), e uma segunda, onde se estudou numericamente a influência conjunta da oscilação anual de temperatura à superfície (para diferentes cidades do território nacional) e do carregamento térmico imposto pela estaca termoativa no campo de temperaturas do solo. Para cada um dos cenários estudados foram realizadas análises distintas, onde se procurou avaliar a resposta do solo face às variações das suas propriedades térmicas, neste caso as decorrentes da variação do grau de saturação.

#### 4.1 – Definição do modelo, propriedades gerais dos materiais, condições de fronteira e ação térmica

Os cálculos numéricos tiveram por base o método das diferenças finitas aplicado com recurso ao software *FLAC7.0*, módulo *Thermal*, desenvolvido pelo *Itasca Consulting Group* (2011).

O estudo numérico foi conduzido em condições de axissimetria (Figura 8), considerando o solo e o conjunto solo/estaca como meios homogêneos e isotrópicos. Recorreu-se a uma malha de 50m por 60m, cujo aspeto gráfico é ilustrado na Figura 9. Esta apresenta-se mais refinada junto aos limites esquerdo e superior porque aqui se desenvolvem os gradientes térmicos mais elevados durante as análises numéricas. No primeiro caso, por ser essa a zona de implantação da estaca, no segundo, devido à imposição neste limite da oscilação anual de temperatura à superfície. As restantes fronteiras do modelo, onde não são aplicadas as ações térmicas, são consideradas adiabáticas.

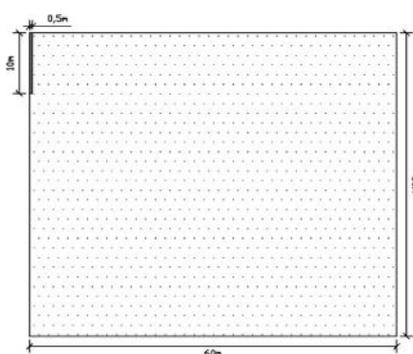


Fig. 8 – Modelo conceptual do cenário analisado

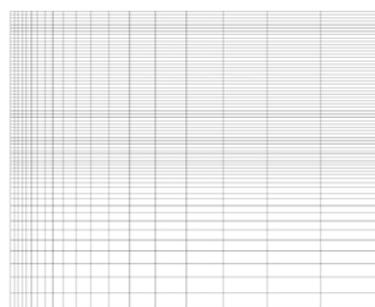


Fig. 9 – Malha utilizada para realização do estudo numérico

Para definição das ações térmicas na estaca e à superfície recorreu-se a uma função periódica, cuja formulação base se apresenta na equação:

$$T(t) = T_m + \Delta T \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{\bar{P}} \cdot tX - \varepsilon_t\right) \quad (6)$$

onde  $T$  é a temperatura,  $T_m$  a temperatura média,  $\Delta T$  a amplitude térmica,  $\bar{P}$  o período de oscilação,  $t$  o tempo e  $\varepsilon_t$  a diferença de fase. A ação térmica na estaca varia em fase com a temperatura à superfície em torno do mesmo valor médio anual, porém com uma amplitude de variação superior. Com efeito, no verão há fluxo de calor do edifício para o terreno (fase de arrefecimento) pelo que a temperatura na estaca é superior à temperatura atmosférica injetando calor para o solo circundante. Por outro lado, no inverno, o sentido do fluxo térmico é o inverso, isto é, o fluxo térmico dá-se no sentido do solo para o edifício (fase de aquecimento). Os parâmetros utilizados para a definição de cada uma das ações térmicas apresentam-se no Quadro 3.

A definição das propriedades térmicas dos diferentes materiais constituintes do modelo teve por base ensaios laboratoriais, metodologias empíricas e dados disponíveis na bibliografia. A condutividade térmica do solo foi determinada utilizando os resultados experimentais obtidos nos ensaios número dois e três, e o seu calor específico através da média aritmética ponderada tal como se encontra definido em Brandl (2006) e Rees *et al.* (2000). Por fim, as propriedades térmicas do betão constituinte da estaca foram obtidas com base em valores da bibliografia disponíveis em Khan (2002). Estes valores correspondem à utilização de agregados em estados de saturação nula e total.

**Quadro 3** - Parâmetros utilizados para definição das acções térmicas à superfície e na estaca

Acção Térmica	Localização	$T_m$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$\bar{P}$ (anos)	$\varepsilon_t$ (s)
Superfície	Lisboa	17,1*	4,0*	1	0
	Porto	14,65	1,85		
	Beja	16,55	6,05		
Estaca	-	17,1	9,0		

\*fonte: <http://www.pordata.pt/Subtema/Portugal/Poluicao+Atmosferica+e+Clima-86>

No Quadro 4 apresentam-se em resumo os parâmetros introduzidos no modelo para as diferentes análises numéricas desenvolvidas. A definição das propriedades térmicas dos diferentes materiais constituintes do modelo teve por base ensaios laboratoriais, metodologias empíricas e dados disponíveis na bibliografia. A condutividade térmica do solo foi determinada utilizando os resultados experimentais obtidos nos ensaios número dois e três, e o seu calor específico através da média aritmética ponderada tal como se encontra definido em Brandl (2006) e Rees *et al.* (2000). Por fim, as propriedades térmicas do betão constituinte da estaca foram obtidas com base em valores da bibliografia disponíveis em Khan (2002). Estes valores correspondem à utilização de agregados em estados de saturação nula e total. No Quadro 4 apresentam-se em resumo os parâmetros introduzidos no modelo para as diferentes análises numéricas desenvolvidas.

**Quadro 4** - Propriedades térmicas do betão e do solo

Meio	$S_r$ (%)	Comprimento ( $L$ ) (m)	Diâmetro ( $D$ ) (mm)	Condutividade térmica ( $\lambda$ ) ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	Calor específico ( $c$ ) ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
ESTACA	0	10	1000	2,03 <sup>c)</sup>	940 <sup>c)</sup>
	100			2,93	1257
SOLO	0			0,452 <sup>b)</sup>	882,88
	100			2,74 <sup>c)</sup>	2115,07

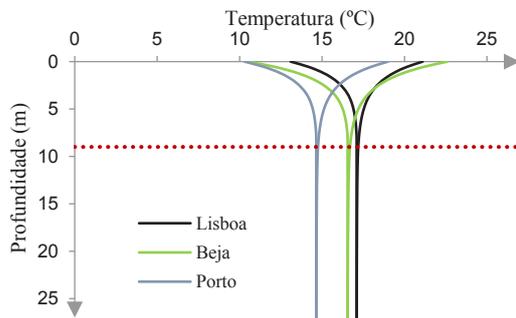
a) Obtido pelo método da média aritmética ponderada, b) Determinado em laboratório, c) Segundo Khan (2002)

A ação térmica anual foi aplicada em todas análises por um período de 4 anos, tendo-se partido de uma temperatura inicial uniforme e igual à temperatura média atmosférica do local em questão. Verificou-se que a distribuição sinusoidal das temperaturas apresentava variações muito reduzidas no segundo ano e, no terceiro, já estava estabilizada. Estes resultados podem também ser encontrados em Lopes (2014).

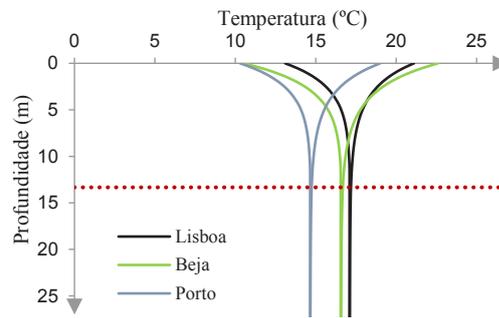
## 4.2 – Resultados e discussão

### 4.2.1 – Estudo numérico sem introdução de estrutura termoativa de fundação

Para o estudo numérico relativo à influência da variação anual de temperatura à superfície no solo em profundidade, apresentam-se nas Figuras 10 e 11 os perfis máximos e mínimos de temperatura obtidos para as cidades de Lisboa, Beja e Porto para os dois extremos de estado de saturação do meio e para uma ação térmica de período anual. As temperaturas médias anuais destas cidades são de 17, 1°C para Lisboa, 16,55°C para Beja e 14,65°C para o Porto. Refira-se que para este caso concreto – condução térmica devida a uma ação térmica num meio homogéneo semi-finito – existe uma solução analítica para a distribuição da temperatura em profundidade. Os resultados obtidos por via analítica (cujas expressões se podem encontrar, por exemplo em Brandl (2006), coincidem com os que resultaram das análises numéricas, permitindo validar os modelos numéricos.



**Fig. 10** – Perfis verticais de temperatura máxima e mínima,  $S_r=0\%$



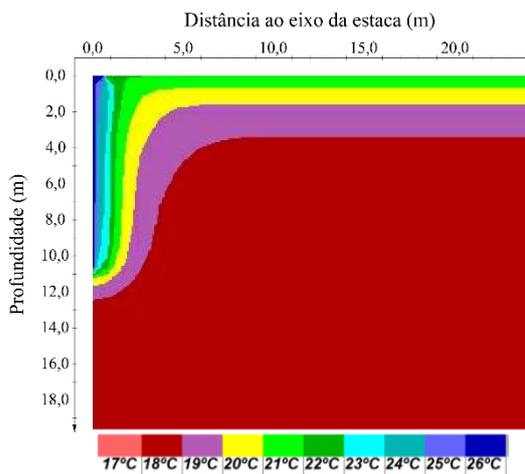
**Fig. 11** – Perfis verticais de temperatura máxima e mínima,  $S_r=100\%$

#### 4.2.2 – Estudo numérico com introdução de uma estrutura termoativa de fundação

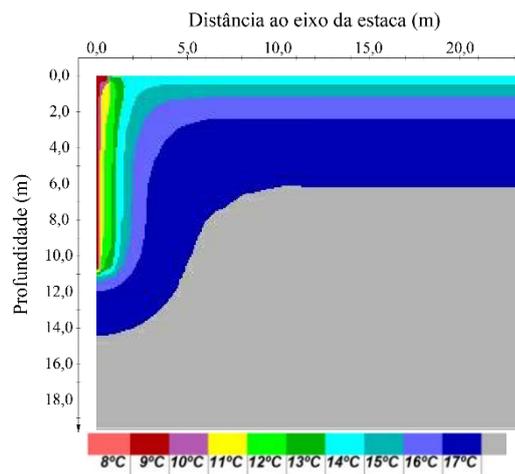
Para a cidade de Lisboa foram realizadas igualmente análises numéricas para estudo do comportamento térmico, considerando agora a presença de uma estaca termoativa com as características acima referidas, igualmente para condições de saturação total e nula.

Os campos de temperatura máxima e mínima ilustram-se nas Figuras 12 a 15, tal como os diferentes perfis verticais de temperatura a várias distâncias radiais à estaca que se apresentam nas Figuras 16 e 17. Para a profundidade de 10m, determinaram-se também os perfis horizontais de temperaturas máximas e mínimas (Figuras 18 e 19). Por fim, calculou-se com base nos resultados numéricos a função taxa de transferência de calor ( $Q$ ) o que tornou possível a determinação da quantidade total de energia transferida entre o solo e a estaca.

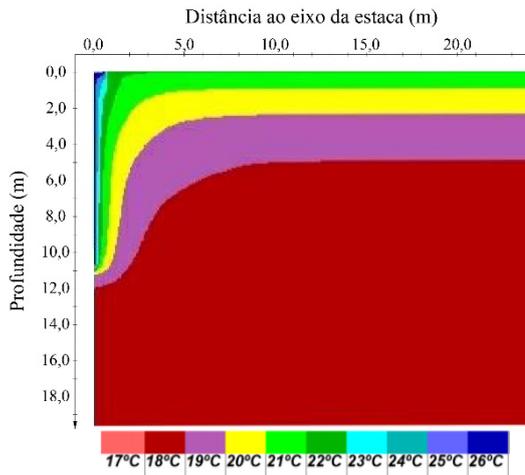
As análises realizadas revelaram que, face ao carregamento imposto e às propriedades térmicas consideradas, o funcionamento da estrutura termoativa perturba o campo de temperaturas do solo até uma distância radial entre 5 e 7 m. Em profundidade, a variação de temperatura desenvolve-se desde a superfície e ao longo de toda a extensão do elemento de fundação, diminuindo em profundidade tal como esperado.



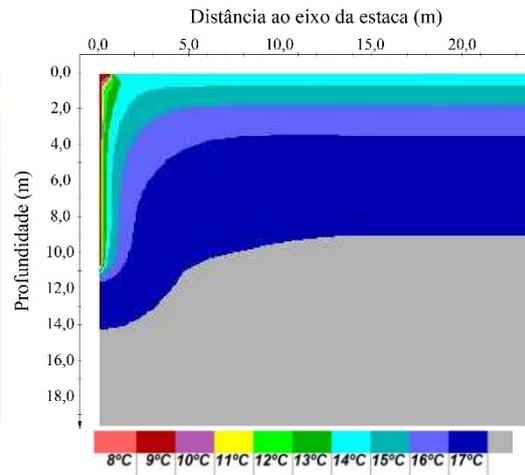
**Fig. 12** – Campos de temperatura máxima  $S_r=0$



**Fig. 13** – Campos de temperatura mínima  $S_r=0$



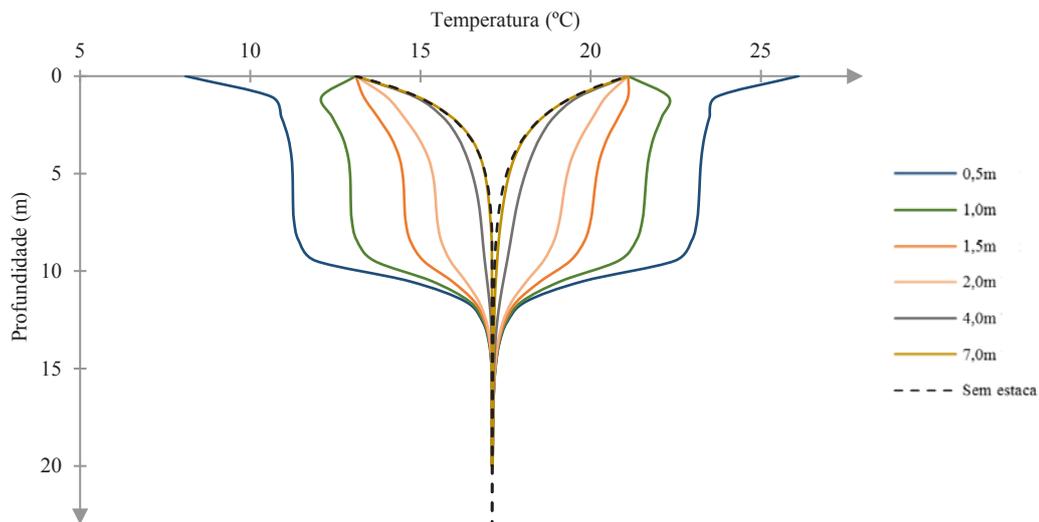
**Fig. 14** – Campo de temperatura: máxima  $S_r = 100$



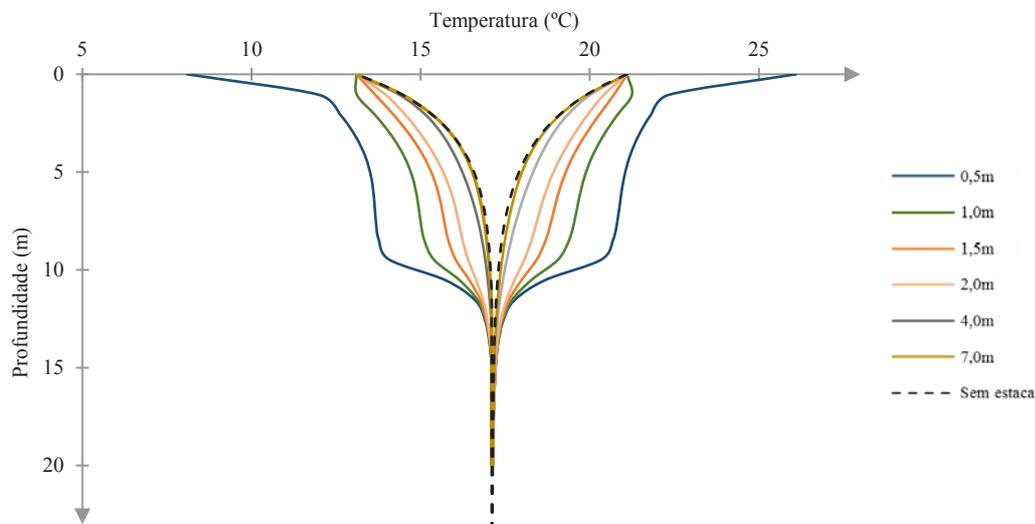
**Fig. 15** – Campo de temperatura: mínima  $S_r = 100$

Os perfis verticais de temperatura, Figuras 16 e 17, demonstram uma perturbação do campo de temperaturas maior para os casos de  $S_r = 0\%$ . Ou seja, apesar da distância de influência ser sensivelmente a mesma, a oscilação do campo de temperaturas sofre maiores variações no caso seco (perfis de temperatura mais abertos). Tal facto é explicado pela variação do calor específico do solo com o aumento de  $S_r$ . Isto é, comparativamente ao caso saturado, o solo seco apresenta um calor específico substancialmente menor, pelo que, apesar do solo seco ter maior dificuldade em transferir energia térmica, o seu calor específico também inferior torna-o mais suscetível a variações de temperatura, já que a quantidade de energia necessária para que este aumente um grau de temperatura é também menor (caso seco  $882,9 \text{ J}\cdot\text{kg}\cdot\text{K}^{-1}$  e caso saturado  $2115,1 \text{ J}\cdot\text{kg}\cdot\text{K}^{-1}$ ).

Em ambos os casos se verifica, tal como esperado, a convergência do campo de temperaturas para a temperatura média anual à superfície, ou seja, sensivelmente abaixo dos 15,0 m de profundidade a temperatura média do solo é de  $17,5^\circ\text{C}$ .



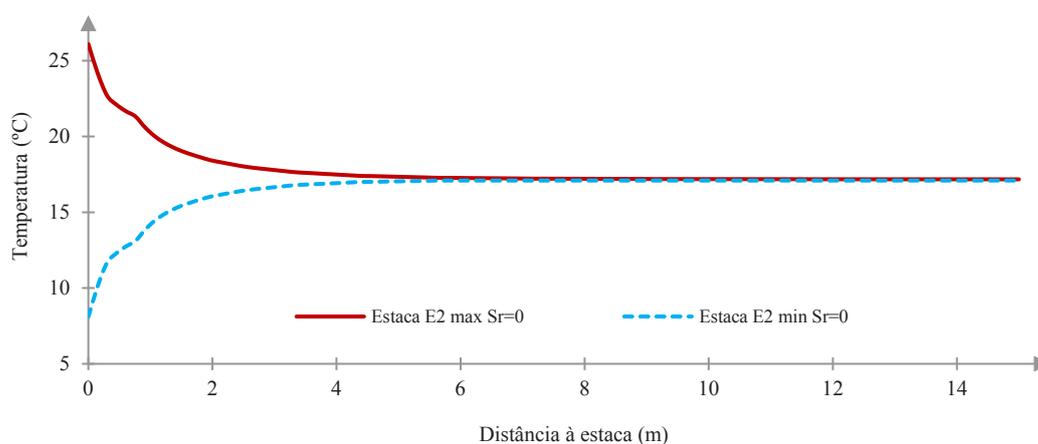
**Fig. 16** – Perfis verticais de temperatura máximos e mínimo com introdução da estrutura termoativa para solo seco



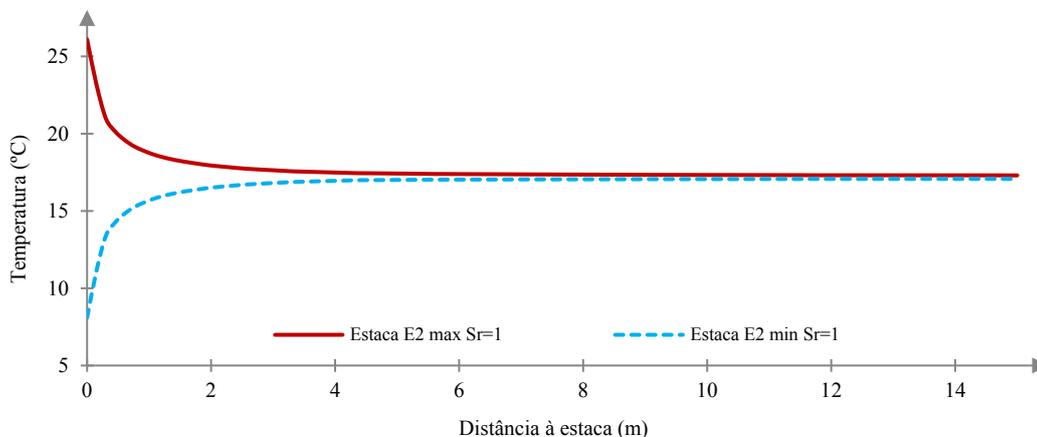
**Fig. 17** – Perfis verticais de temperatura máximos e mínimo com introdução da estrutura termoativa para solo saturado

Nos perfis horizontais obtidos para  $S_r=0$  (Figura 18) é constatável a interface solo estaca, materializada por um ressalto resultado do contraste entre as propriedades térmicas do betão e do solo. Tal facto não se observa no caso saturado em virtude da maior semelhança entre as propriedades térmicas dos dois materiais em análise (Figura 19). É por isso possível concluir que o processo de transferência de calor para em condições de total saturação é mais homogêneo. À semelhança do que se observa nos perfis verticais, também aqui se reconhece a convergência do solo para a temperatura média anual à superfície,  $17,5^{\circ}\text{C}$ , à medida que se aumenta a distância ao eixo da estrutura termoativa de fundação

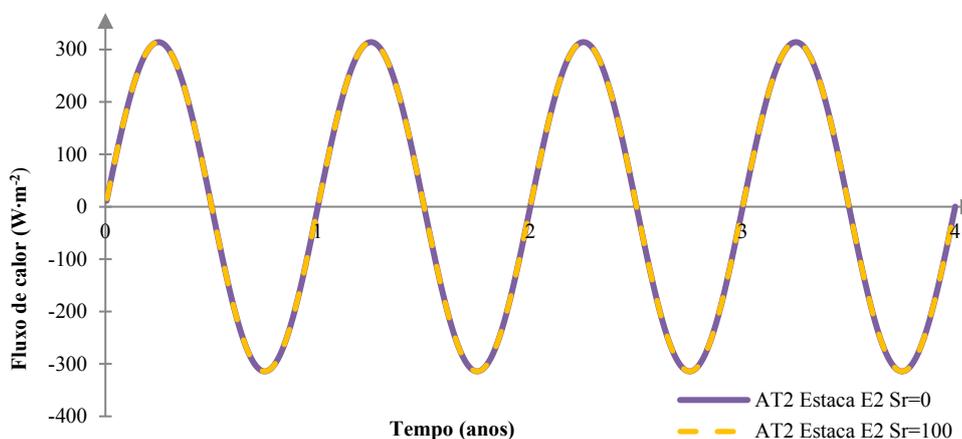
Para as análises realizadas e apresentadas neste trabalho, foram também calculadas as quantidades totais de energia transferida pela estaca, que é de aproximadamente  $1507 \text{ kW}\cdot\text{h}$  por ano (aproximadamente  $6030 \text{ kW}\cdot\text{h}$  para um período de quatro anos). Estes valores foram obtidos integrando a função taxa de transferência de calor, no limite da estaca (Figura 20).



**Fig. 18** – Perfis horizontais de temperatura a 10m de profundidade para solo seco



**Fig. 19** – Perfis horizontais de temperatura a 10m de profundidade para solo saturado



**Fig. 20** – Função taxa de transferência de calor por condução

De recordar que estes valores correspondem à energia permutada por uma única estaca termoativa, os valores seriam superiores caso a transferência de calor fosse realizada através de grupos de estacas, devendo nesse caso ser tido em consideração o efeito de grupo.

## 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho são apresentados parte dos resultados dos estudos de caracterização térmica por via experimental de um solo arenoso e da modelação numérica de um meio homogéneo submetido à ação térmica conjunta da variação sazonal da temperatura atmosférica e de uma estaca termoativa em operação levados a cabo por Lopes (2014), no âmbito da sua Dissertação de Mestrado.

No que se refere à caracterização térmica, foram apresentados resultados para condições de solo seco utilizando o *Hot Wire Method*. Os resultados obtidos foram determinados recorrendo a ajustes que, em qualquer caso, superaram valores do coeficiente de regressão pelo MMQ de 0,990. Verificou-se, como esperado, um aumento da condutividade térmica com a redução do índice de vazios e aumento do peso volúmico. Os valores de condutividade térmica obtidos revelaram ser consistentes com valores disponíveis na bibliografia para solos arenosos.

No que concerne à modelação numérica, tal com referido, foram apenas apresentadas parte das análises numéricas efetuadas por Lopes (2014). Inicialmente testou-se o modelo na aplicação de uma onda sinusoidal no topo de um semi-estrato infinito, a que se fez equivaler a temperatura atmosférica aplicada à superfície do terreno. Nas análises subsequentes aplicou-se uma ação térmica numa estaca de fundação termoativa, em fase com a ação da temperatura atmosférica. Os resultados mostraram que as quantidades de energia transferidas entre o solo e a estaca e os campos de temperatura são dependentes do grau de saturação do solo, diâmetro da estaca, calor específico, condutividade térmica e ação térmica imposta.

Futuramente há que melhorar o dispositivo de ensaio por forma a realizar com fiabilidade ensaios para solos de outra natureza e para graus de saturação diferentes de zero. Quanto à modelação numérica, os estudos subsequentes devem necessariamente considerar o comportamento termomecânico, para deste modo avaliar qual a influência que injeção e extração de calor apresenta quer no solo quer no elemento estrutural (a estaca).

## 6 – AGRADECIMENTOS:

Os autores agradecem todo o apoio concedido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Beja e Fundação para a Ciência e Tecnologia através do projeto FCT PTDC/ECM-GEO/0728/2014 “Sustentabilidade de sistemas geotérmicos superficiais. Estudos aplicados a climas do sul da europa.”

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adam, D.; Markiewicz, R. (2009). *Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers*. Géotechnique, 59(3), 229–236.
- Banks, D. (2012). *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*. Oxford, UK: Wiley-Blackwell. <http://doi.org/10.1002/9781118447512>
- Brandl, H. (2006). *Energy foundations and other thermo-active ground structures*. Géotechnique, 56(2), 81–122. <http://doi.org/10.1680/geot.2006.56.2.81>
- Carlslaw, H. S.; Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of Heat in Solids*; Clarendon Press, Oxford Science Publications, UK, ISBN 0-19-853368-3.
- Çengel, Y. (2003). *Heat Transfer, A Practical Approach*; 2nd ed, McGraw-Hill, New York, USA, 853 p.
- Farouki, O.T. (1981). *Thermal properties of soils* (No. CRREL-MONO-81-1). Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH.
- Franco, A. (2007). *An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient Hot-Wire Method*. Applied Thermal Engineering, 27 (14-15), 2495–2504.
- Healy, J. J.; de Groot, J. J.; Kestin, J. (1976). *The theory of the transient Hot-Wire Method for measuring thermal conductivity*. Physica 82C, 392–408.
- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*; 2nd ed, Academic Press, London, UK, 225 p.
- Itasca (2011). *FLAC-Fast Lagrangean Analysis of Continua, Version 7.0 User's Manual*, Minnesota, Itasca Consulting Group.

- Khan, M. (2002). *Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models*. Building and Environment, 37(6),607–614. [http://doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00061-0](http://doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00061-0)
- Laloui, L.; Di Donna, A. (2013). *Energy Geostructures: Innovation in Underground Engineering*; Wiley and Sons, London, UK, 304 p.
- Low, J.; Loveridge, F.; Powrie, W. (2015). *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.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*; 2nd edition, Cambridge University Press, New York, USA, 393 p.
- Lopes, H. (2014). *Sistemas Geotérmicos de Baixa Entalpia-Estudos de Caracterização Térmica*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
- Lund, J.; Freeston, D.; Boyd, T. (2011). *Direct utilization of geothermal energy, 2010 worldwide review*. Geothermics, 40(3), 159–180.
- Madureira, P.; Antunes, P. (2012). *Geotermia de muito baixa entalpia. Razões e vantagens do seu aproveitamento*. Geonovas, 25, 27–33.
- McCorry, M.; Jones, G. (2011). *Geotrained Training Manual for Designers of Shallow Geothermal Systems*. Brussels: GEOTRAINET.
- Merckx, B.; Dudoignon, P.; Garnier, J. P.; Marchand, D. (2012). *Simplified Transient Hot-Wire Method for Effective Thermal Conductivity Measurement in Geomaterials: Microstructure and Saturation Effect*. Advances in Civil Engineering, 2012, 1–10.
- Nikolaev, I.V.; Leong, W.H.; Rosen, M.A. (2013). *Experimental investigation of soil thermal conductivity over a wide temperature range*. International Journal of Thermophysics, 34, 1110-1129.
- Pahud, D.; Hubbuch, M. (2007). *Measured thermal performances of the energy pile system of the dock midfield at Zurich Airport*, European Geothermal Congress.
- Pettijohn, F. (1948). *A preface to the classification of Sedimentary rocks*. The Journal of Geology, 56(2), 112–117.
- Presley, M.; Christensen, P. (1997). *Thermal conductivity measurements of particulate materials 1. A review*. Journal of Geophysical Research, 102(E3), 6535–6549.
- Rees, S. W.; Adjali, M. H.; Zhou, Z.; Davies, M.; Thomas, H. R. (2000). *Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 4(3), 213–265. [http://doi.org/10.1016/S1364-0321\(99\)00018-0](http://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00018-0)
- VDI 4640 (2010) *Thermal Use of the Underground. Part 1: Fundamentals, approvals, environmental aspect*. Berlin: VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU).
- Vieira, A.; Maranhã, J. (2012). *Estudo de Modelação Numérica do Comportamento de Estruturas Termoactivas*. Atas do XIII Congresso Nacional de Geotecnia. doi10.13140/RG.2.1.2894.7368
- Williams, J.; Smith, M. (1989). *The Frozen Earth-Fundamentals of Geocryology*; Cambridge University Press, New York, USA, 323 p.