



**Universidade de  
Aveiro  
Ano 2016**

Departamento de Engenharia Civil

**Adelino Joaquim  
Ribeiro Costa**

**Sustentabilidade de Sistemas Geotérmicos  
Superficiais: Estudos Aplicados a Climas do Sul da  
Europa**





**Adelino Joaquim  
Ribeiro Costa**

**Sustentabilidade de Sistemas Geotérmicos  
Superficiais: Estudos Aplicados a Climas do Sul da  
Europa**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil realizada sob a orientação científica do Doutor José Claudino de Pinho Cardoso, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, e do Engenheiro José Alberto Marques Lapa, Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro



## **o júri**

**Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa**  
Professora Associada da Universidade de Aveiro

**Doutora Ana Maria Carvalho Pinheiro Vieira**  
Investigadora Auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (arguente)

**Professor Engenheiro José Alberto Marques Lapa**  
Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Aveiro (coorientador)



## **agradecimentos**

Gostaria de dedicar esta página da dissertação às pessoas que me ajudaram e apoiaram ao longo de todo o meu percurso académico.

Agradeço aos meus pais, e ao meu irmão pelo apoio prestado ao longo deste percurso.

À Ana Rita Henriques um enorme obrigado pelo apoio incondicional que me deste ao longo destes 5 anos. Sem ti não teria sido a mesma coisa chegar até este momento, o que mostra a importância que tens no meu sucesso.

Um especial agradecimento ao Professor José Alberto Marques Lapa, meu coorientador, pelo apoio, disponibilidade, acessibilidade, pela confiança dada e pela motivação demonstrada durante a realização deste trabalho.

Ao Professor José Claudino de Pinho Cardoso, meu orientador, por todos os recursos e oportunidades disponibilizadas.

Um grande agradecimento ao Senhor Vítor e à Engenheira Maria Carlos, por toda a ajuda e apoio demonstrado durante o tempo passado no laboratório.

Queria ainda agradecer a todas as pessoas que contribuíram para que conseguisse obter o sucesso académico, nomeadamente amigos e professores.

Dissertação elaborada no âmbito do projeto SUCCEsS - Sustentabilidade de sistemas geotérmicos superficiais. Estudos aplicados a climas do sul da Europa, PTDC/ECM-GEO/0728/2014, com o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e Tecnologia/MCTES.



**palavras-chave**

Engenharia, dissertação, solo, propriedades térmicas, condutibilidade térmica, velocidade de propagação, instrumentação, modelação, ANSYS Fluent

**resumo**

O desenvolvimento deste trabalho teve como principal interesse providenciar um melhor conhecimento relativamente a sistemas geotérmicos superficiais com aplicação em climas da Europa do sul.

De entre várias vertentes de estudo, todo o trabalho de análise foi centrado no comportamento de um determinado solo relativamente a variações de temperatura, recriando deste modo um sistema geotérmico com aplicação em climas da Europa do sul.

Esta análise baseou-se numa primeira instância na caracterização física do solo, permitindo deste modo a criação de um modelo em laboratório (instrumentação) e de um modelo numérico (modelação).

A partir destes modelos, realizou-se uma comparação entre os dados obtidos em laboratório com os dados obtidos das modelações criadas, com o objetivo de se determinar as propriedades térmicas do solo utilizado para o caso de estudo.



**keywords**

Engineering, thesis, soil, thermal properties, thermal conductivity, propagation speed, instrumentation, modeling, ANSYS Fluent

**abstract**

The development of this work had as main interest to provide a better knowledge regarding superficial geothermal systems with application in climates of south Europe.

From the analysis of several studies, all the work of analysis was focused on the behavior of a certain soil relative to temperature variations, recreating a geothermal system with application in climates of south Europe.

This analysis was based on a first instance in the physical characterization of the soil, allowing the creation of a laboratory model (instrumentation) and a numerical model (modeling).

From these models, a comparison was made between the data obtained in the laboratory and the data obtained from the created models, in order to determine the thermal properties of the soil used for the case of study.



# ÍNDICE GERAL

1.	Introdução .....	1
1.1.	Enquadramento .....	1
1.2.	Objetivos e metodologia .....	3
1.3.	Estrutura da dissertação .....	3
2.	Estado de arte.....	5
2.1.	Descrição de geotermia superficial.....	5
2.1.1.	Conceito de geotermia superficial .....	5
2.1.2.	Componentes de geotermia superficial.....	7
2.1.2.1.	Circuito primário .....	7
2.1.2.2.	Bombas de calor reversível.....	7
2.1.2.3.	Circuito secundário.....	9
2.2.	Legislação .....	9
2.3.	Sustentabilidade de sistemas geotérmicos superficiais .....	10
2.4.	Clima da Europa do Sul.....	14
2.5.	Componente geotécnica.....	16
2.5.1.	Conceito de solo .....	16
2.5.2.	Nível freático .....	17
2.5.3.	Propriedades térmicas do solo .....	18
2.6.	Análise laboratorial.....	20
2.7.	Análise numérica .....	20
2.7.1.	Equações base.....	22
3.	Análise laboratorial.....	25
3.1.	Caracterização do solo.....	25
3.1.1.	Quantidade de matéria orgânica .....	26
3.1.2.	Teor em água .....	27
3.1.3.	Composição granulométrica .....	28
3.1.4.	Densidade das partículas sólidas e Peso volúmico.....	31
3.1.5.	Limites de Atterberg.....	32
3.1.5.1.	Limite de Liquidez.....	32
3.1.5.2.	Limite de Plasticidade .....	34
3.1.6.	Classificação do solo .....	35
3.2.	Instrumentação do solo.....	36
3.2.1.	Modelo experimental.....	36
3.2.1.1.	Considerações.....	43
3.2.2.	Índice de vazios .....	44
3.2.3.	Processo de aquecimento do solo .....	44
3.2.3.1.	Procedimento experimental .....	44
3.2.3.2.	Análise de resultados .....	45
3.2.4.	Processo de refrigeração do solo .....	50
3.2.4.1.	Procedimento experimental .....	51
3.2.4.2.	Análise de resultados .....	52
3.2.5.	Velocidade de propagação da onda de calor .....	55
3.2.5.1.	Velocidade durante o aquecimento do solo.....	56
3.2.5.2.	Velocidade durante a refrigeração do solo .....	57

3.2.6.	Condutibilidade térmica .....	59
3.2.7.	Comparação entre aquecimento e refrigeração do solo .....	59
4.	Análise computacional .....	63
4.1.	AutoCAD .....	63
4.2.	Pointwise .....	64
4.3.	ANSYS Fluent.....	65
4.3.1.	Verificação das malhas.....	65
4.3.2.	Tipo de análise numérica.....	66
4.3.3.	Equação de energia.....	67
4.3.4.	Definição dos materiais .....	67
4.3.5.	Verificação das condições de fronteira .....	68
4.3.6.	Calibração do modelo numérico .....	68
4.3.7.	Número de interações.....	69
5.	Análise de resultados.....	71
5.1.	Modelação do aquecimento do solo .....	72
5.2.	Modelação da refrigeração do solo .....	77
5.3.	Considerações Gerais .....	80
6.	Conclusão .....	83
7.	Bibliografia.....	87
7.1.	Bibliografia principal .....	87
7.2.	Bibliografia de consulta .....	88
	Anexo .....	89
	Anexo 1- Planos Realizados em AutoCAD .....	91
	Anexo 2- Realização do provete em betão.....	97
	Anexo 3- Realização do sistema de bombagem.....	103
	Anexo 4- Montagem do modelo experimental.....	107

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.	Propriedades térmicas de alguns materiais [12] .....	19
Tabela 2.	Quantidade de matéria orgânica presente na amostra .....	27
Tabela 3.	Teor em água do solo em estudo .....	28
Tabela 4.	Teor em água diário durante a compactação do solo.....	28
Tabela 5.	Dados relacionados com a lavagem do solo.....	29
Tabela 6.	Valores relativos à peneiração do solo .....	29
Tabela 7.	Valores relativos ao ensaio do “ <i>SediGraph</i> ” .....	30
Tabela 8.	Caracterização do peso volúmico do solo em estudo.....	32
Tabela 9.	Resultados obtidos no ensaio da concha da Casagrande.....	34
Tabela 10.	Dados obtidos para o cálculo do limite de plasticidade .....	35
Tabela 11.	Temperaturas registadas durante a instrumentação (°C) .....	50
Tabela 12.	Comparação de variações de temperatura a 7 dias de instrumentação (°C) ....	50
Tabela 13.	Dados obtidos através das 24 horas de instrumentação.....	54
Tabela 14.	Velocidade de propagação da onda de calor em cada sensor .....	57
Tabela 15.	Velocidade de propagação da onda de calor em casa sensor .....	58
Tabela 16.	Variação da temperatura ao longo de 24 horas (°C).....	61
Tabela 17.	Características referentes ao solo seco .....	67
Tabela 18.	Temperatura para a modelação relativa ao aquecimento do solo.....	69
Tabela 19.	Temperatura para a modelação relativa à refrigeração do solo.....	69
Tabela 20.	Dados responsáveis pelas interações .....	70
Tabela 21.	Dados relativos à modelação e à instrumentação (°C) .....	74
Tabela 22.	Dados relativos à modelação e a 24 horas de instrumentação (°C).....	75
Tabela 23.	Dados relativos à modelação/instrumentação da refrigeração do solo (°C) ....	79



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Funcionamento do sist. geotérmico durante arrefecimento/aquecimento [4].....	6
Figura 2.	Funcionamento de bomba de calor reversível [8].....	8
Figura 3.	Exemplificação do sistema geotérmico [9].....	9
Figura 4.	Comparação de emissões de CO <sub>2</sub> de várias fontes de energia [8].....	11
Figura 5.	Temperatura média mensal do ar (°C) em dois locais distintos .....	14
Figura 6.	Humidade Relativa (%) na cidade de Aveiro .....	15
Figura 7.	Dissipação de calor do solo sujeito a fluxo de água .....	17
Figura 8.	Processo de modelação .....	21
Figura 9.	Fases de execução do ANSYS Fluent .....	22
Figura 10.	Solo utilizado para a análise laboratorial.....	25
Figura 11.	Matéria orgânica encontrada durante a desagregação .....	26
Figura 12.	Curva granulométrica do solo em estudo .....	30
Figura 13.	Matéria orgânica nos picnómetros: a) picnómetro 22; b) picnómetro 8.....	31
Figura 14.	Procedimento de ensaio: a) colocação da pasta; b) criação do sulco; c) união das duas metades (fim do ensaio) .....	33
Figura 15.	Relação entre o teor em água e o número de pancadas .....	34
Figura 16.	Primeira planta idealizada para a instrumentação .....	37
Figura 17.	Planta realizada em AutoCAD do modelo experimental.....	38
Figura 18.	Sequência de passagem do pilão no solo em planta: a) 1ª passagem; b) 2ª passagem; c) 3ª passagem.....	39
Figura 19.	Provete de betão utilizado no modelo experimental.....	40
Figura 20.	Provete pronto para ser enchido por betão .....	40
Figura 21.	Ligação das tubagens no interior do provete .....	41
Figura 22.	Sistema de bombagem usado no modelo experimental.....	42
Figura 23.	Modelo experimental .....	43
Figura 24.	Fase de aquecimento do solo .....	46
Figura 25.	Temperaturas em alguns pontos da instrumentação: a) iniciais; b) finais .....	47
Figura 26.	Comportamento teórico do solo sujeito a duas fontes de aquecimento iguais .	48
Figura 27.	Dissipação de calor do solo .....	49
Figura 28.	Formação de condensações durante o transporte da água .....	52
Figura 29.	Fase de refrigeração do solo .....	53
Figura 30.	Temperaturas em alguns pontos da instrumentação: a) iniciais; b) finais .....	54
Figura 31.	Comportamento teórico do solo sujeito a duas fontes de refrigeração iguais ..	55
Figura 32.	Delimitação da temperatura para a velocidade de propagação (aquecimento).	56
Figura 33.	Delimitação da temperatura para a velocidade de propagação (refrigeração)..	58
Figura 34.	Instrumentação de 24 horas: a) aquecimento; b) refrigeração.....	60
Figura 35.	Geometria do modelo obtido através do AutoCAD .....	64
Figura 36.	Aspeto da malha e designação das condições de fronteira.....	65
Figura 37.	Esquema de modelação “ <i>axisymmetric</i> ” .....	66
Figura 38.	Modelo numérico final no ANSYS Fluent .....	70
Figura 39.	Localização dos pontos de monitorização .....	71
Figura 40.	Bolbo de temperatura na fase de aquecimento do solo.....	72
Figura 41.	Pontos de monitorização com respetiva temperatura (aquecimento) .....	72
Figura 42.	Aquecimento do solo: a) instrumentação; b) modelação.....	73

Figura 43. Aquecimento do solo: a) 24 horas de instrumentação; b) modelação.....	76
Figura 44. Bolbo de temperatura na fase de arrefecimento do solo .....	77
Figura 45. Pontos de monitorização com respetiva temperatura (refrigeração) .....	77
Figura 46. Refrigeração do solo: a) instrumentação; b) modelação .....	78
Figura 47. Comportamento do fluxo: a) aquecimento do solo; b) refrigeração do solo....	80

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

Desde que o homem descobriu as potencialidades e possibilidades da utilização das energias não renováveis, este tentou transformar a matéria-prima extraída do solo em prol do seu próprio conforto.

O excessivo uso das energias não renováveis fez com que no limiar da década de 70, o mundo assistisse à primeira crise energética provocada pelo impacto petrolífero, onde a procura da sociedade por petróleo excedia em grande escala a sua produção. Devido a este impacto, o preço da energia subiu de forma substancial com o objetivo de combater as exigências estabelecidas pela sociedade relativamente ao consumo energético.

Desde a crise energética, referida anteriormente, a energia passou a ser vista como um bem escasso. Nos países europeus que possuem economias mais avançadas pode-se constatar grandes avanços a nível de investigação em torno das possibilidades de substituição de energias não renováveis.

O uso das energias renováveis é visto atualmente como um fator de elevada prioridade, sendo dedicados alguns fundos monetários e grandes meios de investigação ao desenvolvimento e permanente atualização destes sistemas. A nível europeu, o tema das energias renováveis representa apenas uma pequena fatia de um bolo associado ao consumo energético da população.

O possível uso das energias renováveis permite a redução do uso da matéria-prima fóssil, mas também a redução de emissões nocivas para o ambiente, nomeadamente emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção dessa energia.

A climatização de edifícios representa uma parte significativa do uso de energias não renováveis, essencialmente o gás natural e o gásóleo para aquecimento. Muitos países europeus já utilizam energias renováveis, contrariando o uso de energias não renováveis para climatização (aquecimento e arrefecimento) dos seus locais de trabalho e das suas habitações, assim como para o aquecimento de águas sanitárias.

Atualmente, existem inúmeras fontes e formas de extração de energia proveniente da natureza, sendo esta extração executada através de conceitos de biomassa, energia eólica, hídrica, hidrogénio, oceanos, solar ou geotérmica.

Países como a Alemanha, Áustria e Suíça destacam-se como sendo pioneiros no que se refere à climatização de edifícios usando calor proveniente do solo, utilizando para o efeito sistemas geotérmicos com o objetivo principal de aquecimento dos edifícios (apesar de este termo encontrar-se em mudança devido às alterações climáticas). É de realçar que o seu clima é favorável a este aspeto, ou seja, em climas frios existe mais necessidade de aquecimento do que arrefecimento do espaço.

Em Portugal e no restante território pertencente à Europa do sul, o tema da geotermia ainda não apresenta grande importância comparativamente ao norte e centro da Europa. É de realçar que em Espanha já existe um elevado avanço a nível de investigação relativamente a outros países pertencentes à Europa do sul.

Ao contrário dos países anteriormente referidos (Alemanha, Áustria e Suíça), o clima na Europa do sul não é constante ao longo do ano, ou seja, a temperatura de Verão e de Inverno é significativamente diferente, fazendo com que seja necessário proceder ao arrefecimento e aquecimento dos edifícios. Para além deste fator, a temperatura não se encontra distribuída igualmente por todos os meses, fazendo com que possa haver mais necessidades de arrefecimento ou aquecimento.

Em Portugal continental existem poucos edifícios dotados de equipamentos de geotermia, sendo que os únicos edifícios com este tipo de tecnologia encontram-se unicamente na Universidade de Aveiro. Os Campi académicos possuem já vários edifícios concebidos com climatização com fonte geotérmica de forma a possibilitar um controlo considerado a nível de eficiência térmica. Os edifícios dotados de fonte de energia geotérmica são o Complexo Interdisciplinar de Ciências Físicas Aplicadas à Nanotecnologia e à Oceanografia (CICFANO), o Edifício de Comunicações Óticas, Comunicações Rádio e Robótica (ECORR), o Complexo das Ciências de Comunicação e Imagem (CCCI) e a Escola Superior de Saúde da Universidade de Aveiro (ESSUA), todos em Aveiro e a Escola Superior Aveiro Norte (ESAN) em Oliveira de Azeméis.

Todos os departamentos referidos anteriormente permitem à Universidade de Aveiro fazer um desenvolvimento no estudo a nível dos conceitos de geotermia, nomeadamente perceber se este sistema representa uma alternativa sustentável às energias não renováveis e compreender o comportamento do solo quando é fornecido calor proveniente do edifício. Relativamente à sustentabilidade da solução, deve-se ter em conta um rol variadíssimo de

fatores condicionantes à sua utilização. Esta temática deve ser encarada com um elevado nível de seriedade visto poder ser um condicionante à utilização de sistemas geotérmicos

## **1.2. Objetivos e metodologia**

A presente dissertação tem como objetivo contribuir para um desenvolvimento da área da geotermia que se encontra-se por explorar, permitindo assim obter um melhoramento e divulgação dos sistemas geotérmicos.

De entre todas as possíveis áreas de investigação, esta dissertação irá abordar o comportamento do solo quando sujeito a temperaturas vindas do interior do edifício (transportadas no interior de estacas termoativas).

Para que seja possível atingir o objetivo proposto será elaborado em laboratório um estudo do comportamento de um solo durante o seu aquecimento e refrigeração (instrumentação).

Com o recurso dos dados fornecidos pelo aquecimento e refrigeração do solo, será possível analisar algumas propriedades térmicas do solo, nomeadamente a condutibilidade térmica do solo e a velocidade de propagação da onda de calor no solo.

Além da componente laboratorial será ainda realizada uma análise numérica com recurso a ferramentas informáticas específicas de modo a tentar modelar e analisar o comportamento do mesmo sujeito às mesmas variações de temperatura.

Por fim, será realizada a comparação de resultados obtidos através da simulação numérica e os resultados provenientes da análise laboratorial, de modo a obter conclusões a nível do comportamento térmico.

## **1.3. Estrutura da dissertação**

A dissertação encontra-se estruturada segundo 6 capítulos, que se distinguem pelos vários assuntos que abordam.

No Capítulo 1 é apresentada uma introdução ao tema principal da dissertação abordando os objetivos e metodologias do trabalho.

No Capítulo 2 é realizado o Estado da Arte. Neste capítulo apresenta-se os pontos importantes para a compreensão do tema da dissertação, tais como a definição de geotermia superficial, o clima da Europa do sul, propriedades geotécnicas, legislação, processo de instrumentação e a modelação realizada.

No Capítulo 3 será realizado a análise do solo a nível das suas características físicas, assim como a instrumentação relacionada com o aquecimento do solo e a sua refrigeração. Além disso será realizado a comparação do comportamento do solo às duas situações descritas em termos de temperatura, velocidade de propagação das ondas de calor e condutibilidades térmicas.

No Capítulo 4 será abordado a componente numérica em que é demonstrado todo o processo de obtenção do modelo numérico, exemplificando todas as considerações tidas em conta.

No Capítulo 5 serão analisados os dados obtidos através do modelo numérico e ainda será realizado a comparação entre esta componente e a instrumentação realizada.

No Capítulo 6, são descritas todas as conclusões encontradas durante a análise dos trabalhos realizados e as propostas de trabalhos futuros.

## **2. ESTADO DE ARTE**

### **2.1. Descrição de geotermia superficial**

#### **2.1.1. Conceito de geotermia superficial**

Os sistemas tradicionais de geotermia têm como base a exploração do calor presente na terra a grandes profundidades, onde se obtêm valores de temperatura sem grande variação durante o dia ao longo do ano, uma vez que “a independência da energia geotérmica relativamente às condições externas, nomeadamente a radiação solar, o vento ou as marés, entre outras energias consideradas renováveis, faz com que esta seja encarada como uma forma de energia contínua disponível 24 horas por dia” [1].

Um dos exemplos simples que se pode obter referente a constantes temperaturas do solo, são as caves ou adegas, onde as temperaturas durante a estação de Verão são frescas e de Inverno são amenas [2].

O uso da energia geotérmica permite, para além de uma redução considerada de emissões de CO<sub>2</sub>, uma redução a nível de fatura energética na ordem dos 75% [3].

A obtenção de calor por sistemas geotérmicos pode ter diferentes fins, podendo-se usar estes sistemas para climatização de habitações, assim como para a produção de energia elétrica. As únicas diferenças consistem na profundidade de exploração e na grandeza de temperaturas presentes no solo.

O estudo relacionado com geotermia superficial atinge geralmente profundidades até 150 metros para aplicações relacionadas com a climatização de edifícios, assim como para o aquecimento de águas sanitárias, mediante do uso e aplicação das bombas de calor.

O solo envolvente do sistema geotérmico pode ser usado de duas formas distintas, sendo que este pode funcionar como recetor durante a estação quente (Verão) de forma a armazenar calor extraído da habitação e pode ser usado como fonte de calor durante a estação fria (Inverno), usando o calor natural do solo assim como algum do calor armazenado durante a estação quente, em certos casos de solo com elevado teor de água.

Na Figura 1, verifica-se um esquema que retrata de forma simplificada o funcionamento de um sistema geotérmico durante a estação quente e fria.



Figura 1. Funcionamento do sist. geotérmico durante arrefecimento/aquecimento [4]

No que diz respeito à heterogeneidade da crosta terrestre, o gradiente térmico no local de estudo pode ser superior ou inferior ao valor médio ( $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), valor este, que permite delimitar a alta e a baixa entalpia [3]. Entalpia corresponde “à quantidade de energia térmica que um fluido, ou objeto, pode permutar com a sua envolvente” [5].

No caso da Europa do sul o gradiente térmico é inferior a  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ou seja, a Europa do sul possui solos com baixa entalpia, com exceção das regiões com intensa atividade vulcânica. Em Portugal continental, a temperatura do solo à superfície ronda os  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sendo verificado o aumento de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  por cerca de cada  $30\text{m}$  de profundidade, fazendo com que o aproveitamento térmico dos solos seja de muito baixa entalpia.

De forma resumida, a divisão da temperatura dos solos referente à entalpia possui a seguinte gama de valores:

- Alta entalpia  $>150^{\circ}\text{C}$
- Baixa entalpia  $<150\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Muito baixa entalpia  $<30^{\circ}\text{C}$

Tendo em consideração os sistemas de muito baixa entalpia, a exploração de energia térmica podem ser efetuados através de um sistema fechado ou aberto. Os sistemas geotérmicos abertos consistem na bombagem e injeção de água subterrânea com o auxílio de furos de água. Nos sistemas fechados, é necessário ter em consideração as maneiras distintas da sua execução:

- Verticais (“sondas geotérmicas instaladas em profundidade no interior de perfurações verticais - ordem de  $80\text{m}$  a  $200\text{m}$ ”) [6]

- Horizontais (“*sondas geotérmicas enterradas a pouca profundidade em disposição de laço ou espiral – ordem de 0,5m a 2m*”) [6]
- Fundações termoativas (“*sondas geotérmicas instaladas nas fundações dos edifícios ou outras estruturas enterradas no subsolo – estacas, paredes moldadas, muros de contenção, etc.*”) [6]

É de realçar que a realização de sistemas geotérmicos através de fundações termoativas são menos dispendiosas do que a execução de furos verticais. Na Universidade de Aveiro constata-se que os sistemas geotérmicos desenvolvidos nos edifícios referidos anteriormente possuem maioritariamente fundações termoativas (estacas termoativas), apesar de alguns estarem equipados com sondas geotérmicas no interior de furos verticais e de até existir o aproveitamento do calor gerado pelas águas residuais domésticas, no que se designou por Biotermia pela sua semelhança com os aproveitamentos de fontes geotérmicas.

Os subcapítulos seguintes terão como objetivo apresentar os componentes de um sistema geotérmico, assim como a sua funcionalidade.

## 2.1.2. Componentes de geotermia superficial

### 2.1.2.1. Circuito primário

De forma sucinta, o circuito primário encontra-se colocado diretamente no interior do solo, sendo este constituído por permutadores que podem estar inseridos em elementos de betão armado (estacas, paredes moldadas, etc.), assim como no interior de perfurações verticais. É de realçar que o solo possui um papel importante (principal) no circuito primário devido às trocas de calor.

Os permutadores possuem no seu interior um fluido capaz de absorver, armazenar e libertar energia térmica proveniente do solo ou do edifício. O fluido circulante nos permutadores pode ser água ou uma mistura salina, no entanto, o mais adequado seria uma mistura de anticongelante, água e aditivos contra a corrosão evitando possíveis danos no sistema. [7]

### 2.1.2.2. Bombas de calor reversível

As bombas de calor funcionam tendo conta um princípio físico em que um gás aquece quando se comprime e arrefece quando se expande. Este efeito pode ser encontrado em frigoríficos clássicos, já que estes removem o calor interior dissipando-o para exterior, ou seja, dentro do equipamento encontra-se um painel de captação que contém no seu interior

um circuito hidráulico, pelo qual circula um gás liquefeito. Este material tem a tendência a evaporar quando capta calor proveniente do interior do frigorífico, passando de seguida por um compressor de forma a aumentar a temperatura e pressão do gás.

Com o aumento da temperatura efetuado pela passagem no compressor, o gás é transportado para um painel colocado na parte traseira do frigorífico, de forma a dissipar o calor através de trocas térmicas com o ar exterior. Antes do gás entrar novamente no interior do frigorífico, este passa por uma válvula de expansão que provoca a redução de temperatura e pressão abrupta, completando assim o ciclo térmico do equipamento.

Assim com uma bomba de calor torna-se possível através da válvula de expansão refrigerar um espaço durante a estação quente (Verão) e com o compressor proceder ao aquecimento durante a estação fria (Inverno), permitindo deste modo proceder à sua climatização.

Para proceder à climatização do espaço em questão seriam eventualmente necessárias duas bombas de calor em que uma seria apenas responsável pelo aquecimento e a outra pelo arrefecimento.

Para evitar a colocação de duas bombas de calor, surge a possibilidade de realizar o processo de aquecimento e arrefecimento do espaço usando apenas uma única bomba de calor, capaz de ter incorporado um sistema inverso. [8]

As bombas de calor reversíveis têm bastantes potencialidades no que se refere ao aquecimento de águas sanitárias, assim como na climatização de edifícios. Na Figura 2, verifica-se um esquema que retrata funcionamento de uma bomba reversível em fase de aquecimento e arrefecimento.

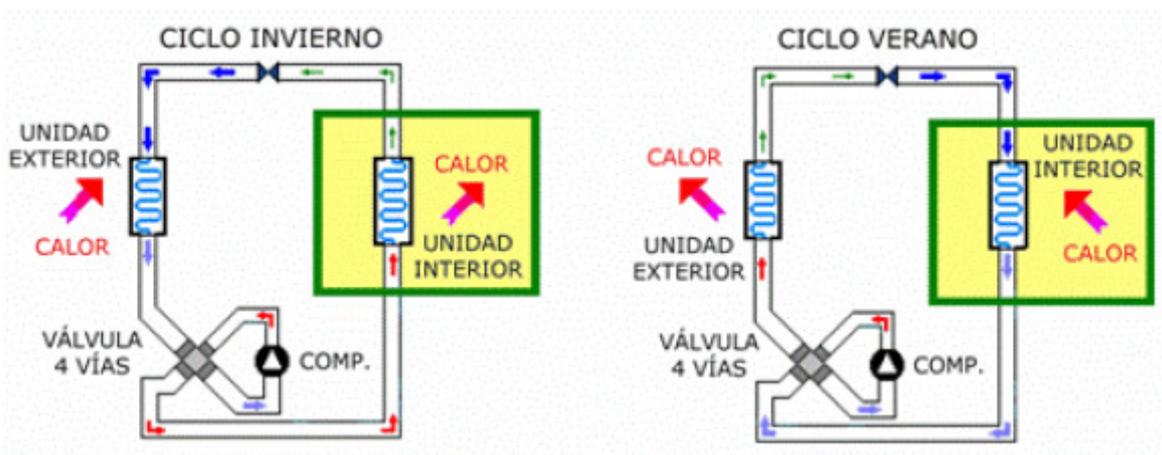


Figura 2. Funcionamento de bomba de calor reversível [8]

### 2.1.2.3. Circuito secundário

O Circuito secundário encontra-se no interior do edifício e compõe a segunda rede de tubagem responsável pela climatização, podendo este ser colocado no pavimento (lajes termoativas) ou nas paredes das divisões a climatizar. Para além da climatização do edifício, o sistema secundário também pode proceder ao aquecimento de águas sanitárias.

Na Figura 3, verifica-se um esquema simples relativamente a um sistema geotérmico.

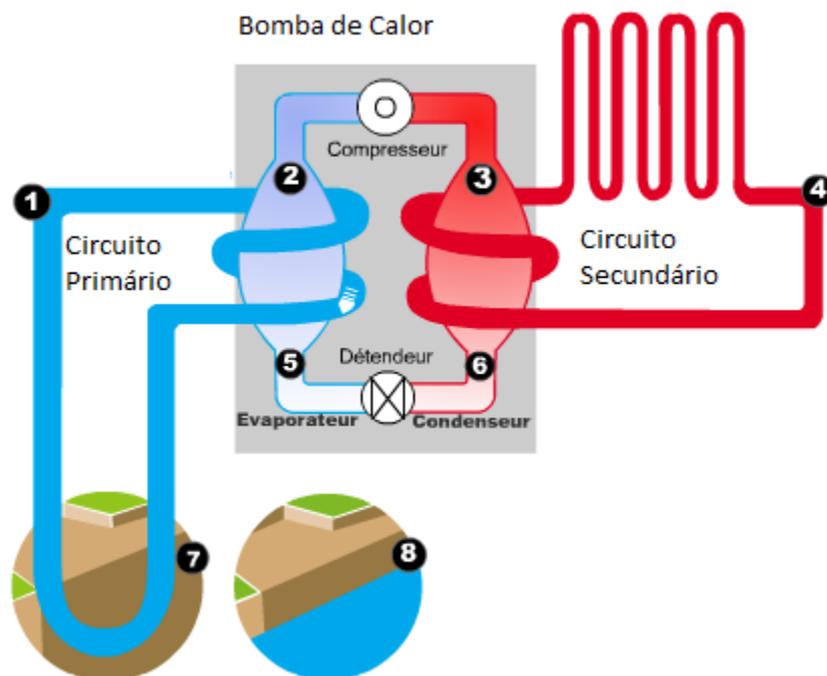


Figura 3. Exemplificação do sistema geotérmico [9]

## 2.2. Legislação

A legislação referente à componente geotérmica é nos dias de hoje um objeto de estudo. Em Portugal não existe muita legislação referente a esta temática, apesar de se encontrar alguns documentos referentes à geotermia, em que é apenas abordada a eficiência térmica de edifícios. No Despacho nº 15793-H/2013 a geotermia é abordada como “quantificação e contabilização do contributo de sistemas para aproveitamento de fontes de energia de fontes de energia renováveis, de acordo com o tipo de sistema” [10]. Além deste despacho, também a diretiva 2010/31/EU faz referência a edifícios autossustentáveis a níveis energéticos. Relativamente a questões de conceção, constata-se uma grande falta de legislação.

A criação de legislação relativa à geotermia possibilitaria a execução de obras geotérmicas com maior eficiência, impondo limitações a inúmeras questões.

A distância entre elementos termoativos, deve ser um fator a ter em consideração, ou seja, quando os elementos termoativos estão muito próximos, estes podem causar interferências entre si, visto que a distância entre eles pode não ser suficiente para que o solo consiga dissipar o calor proveniente do edifício. Assim sendo o solo possui um papel fulcral relativamente à distância entre elementos termoativos.

Quando o solo possui água (solo saturado ou parcialmente saturado), a distância entre elementos termoativos deverá ser superior do que em solos secos, isto deve-se ao facto de água ser um ótimo condutor térmico.

Outro elemento a considerar no que se refere à componente legislativa seria o comprimento do elemento termoativo, tendo em conta o tipo de solo, visto que diferentes solo podem proporcionar diferentes profundidades para obter-se a maior eficiência do sistema geotérmico.

Deste modo torna-se essencial o desenvolvimento de mais estudos acerca da geotermia para colmatar a ausência de legislação necessária para o tema, de forma a criar regras e estabelecer limites à sua utilização. Para além disso, esta legislação deverá ter sempre em consideração a sustentabilidade do sistema.

### **2.3.Sustentabilidade de sistemas geotérmicos superficiais**

Sustentabilidade apresenta-se como sendo uma característica relativa a um processo que permite decidir a sua permanência em certo nível durante um determinado prazo, ou seja, o critério de sustentabilidade permite fazer uma caracterização abrangente relacionada com uma temática, expondo de certa forma vantagens e desvantagens acerca de um caso de estudo.

O conceito de sustentabilidade pode ser também definido como capacidade de o ser humano interagir com o mundo, tendo o objetivo de preservar o meio ambiente. Este conceito possui alguma complexidade, visto que atende a um conjunto de variáveis.

Atualmente, o tema de sustentabilidade tornou-se uma temática de referência na utilização de energias renováveis. Relativamente à geotermia, é necessário efetuar um estudo referente à sustentabilidade de modo a compreender se esta solução é justificável.

Nesta análise de sustentabilidade serão abordadas as seguintes vertentes:

- Económica;
- Ambiental;
- Social;
- Ecológica;
- Institucional;
- Conservação do material;
- Eficiência da solução adotada (componente geotécnica).

O uso de energias renováveis permite contribuir para a diminuição da pegada ecológica causada pelo uso de energias não renováveis. A geotermia como energia renovável para o uso da climatização e aquecimento de águas sanitárias permite obter uma redução significativa de emissões de gases CO<sub>2</sub> nocivos para o ambiente.

Segundo estudos realizados, as emissões de CO<sub>2</sub> por sistemas geotérmicos para climatização são muito inferiores que as emissões causadas por outras fontes de energia. O estudo em causa teve como base uma habitação com aproximadamente 150 m<sup>2</sup> [8].

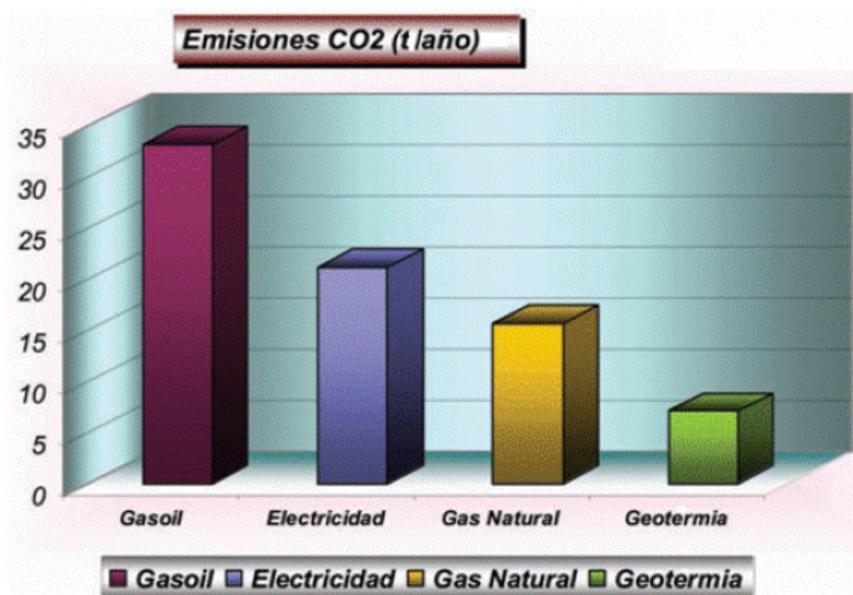


Figura 4. Comparação de emissões de CO<sub>2</sub> de várias fontes de energia [8]

Tendo em conta a figura anterior, constata-se que a energia geotérmica permite uma redução de emissões de CO<sub>2</sub> na ordem dos 86% comparativamente ao gasóleo que é o maior causador de emissões.

Sendo geotermia uma energia renovável, verifica-se que esta energia é proveniente de recursos naturais que se renovam de forma constante, mesmo depois de ter sido usada como forma de calor ou eletricidade.

O uso de geotermia como fonte de calor ou eletricidade, permite efetuar uma redução significativa do uso de energias não renováveis (produtos fósseis), que se encontram em contagem decrescente tendo em conta as suas reservas naturais.

Como a energia geotérmica utiliza calor proveniente do solo, considera-se que o sistema pode ser implementado praticamente todos os locais do planeta, realçando que alguns locais possuem mais vantagens que outros na implementação destes sistemas.

Assim sendo, e de forma geral, a utilização de sistemas geotérmicos permite efetuar uma redução significativa de gases responsáveis pelo efeito de estufa, resultante da climatização de edifícios, em comparação com os resultados obtidos com o uso de recursos não renováveis.

A falta de utilização destes sistemas deve-se maioritariamente à falta de desenvolvimento científico por parte de muitos países, apesar de que em alguns países da Europa, já existe um grande desenvolvimento na matéria em estudo. A mentalidade social é um parâmetro importante relativo à utilização de sistemas substitutos às energias não renováveis, e o uso de geotermia não é exceção.

O uso de energias renováveis, mais precisamente o uso da geotermia, tem como base o melhoramento da qualidade de vida da população. Um dos maiores exemplos onde a sociedade integra a geotermia são Alemanha, Áustria e Suíça em que muitos edifícios já se encontram equipados com este tipo de sistema.

Para mudar esse panorama, em Portugal verifica-se um desenvolvimento considerável da investigação geotérmica, assim como na criação de instituições relacionadas com o tema (Plataforma Portuguesa de Geotermia Superficial).

Apesar de já ter sido referido anteriormente que o parâmetro social é importante, o facto económico não deve ser menosprezado, sendo este maioritariamente preponderante.

A implementação de um sistema geotérmico em uma habitação unifamiliar necessitaria de uma análise profunda dos custos, já que é importante perceber qual e quando seria possível o retorno económico da aplicação do sistema para climatização e aquecimento de águas sanitárias.

A partir do momento que a poupança de energia ultrapassa o investimento, considera-se que o sistema já está a rentabilizar, sendo que esta rentabilização pode ser recuperada ao fim de alguns anos dependendo do tipo de utilização do edifício.

Resumidamente, apesar do elevado investimento nesta solução, conta-se que é uma solução fiável financeiramente, visto que após o período de amortização a poupança energética é considerável.

No que se refere à manutenção do sistema, considera-se que possui uma manutenção económica das bombas de calor, visto que por estarem no interior de edifícios estas não se encontram expostas às condições climatéricas adversas, assim como a atos de vandalismo. Para além dos fatores enunciados é de realçar que a bomba de calor trata-se de um elemento mecânico, fazendo com que seja necessário efetuar uma manutenção periódica aconselhada eventualmente pelo fornecedor.

Relativamente aos permutadores tem-se um custo de manutenção mais acrescido devido a possível desgaste da tubagem com o tempo de uso. É de realçar que esta manutenção é menos periódica do que a de bombas de calor, visto que os permutadores encontram-se no interior de elementos estruturais fazendo com que o seu estado de conservação seja superior. De modo geral, os custos de manutenção encontram-se contrabalançados entre a bomba de calor e os permutadores [11].

A eficiência da solução relativamente à componente geotécnica é um parâmetro de sustentabilidade a ter em conta e que muitas vezes não é considerada apesar da sua importância. A má execução do sistema coloca em causa toda a sua capacidade de funcionamento. Para obter-se a melhor eficiência deve-se ter conta todos os parâmetros influenciadores e desestabilizadores do sistema. O tipo de solo e possível estado de saturação que se encontra, o comportamento deste quando sujeito a trocas de temperatura, o tamanho do elemento termoativo, materiais usados assim como a presença de água são fatores que podem colocar em causa todo o sistema geotérmico implementado no edifício tendo por base a componente geotécnica.

A realização de estudos referentes a estes fatores permitem verificar toda a eficiência da solução, permitindo deste modo clarificar a sua sustentabilidade.

## 2.4. Clima da Europa do Sul

A aplicação de sistemas geotérmicos deve ser ponderada no seu momento de aplicação para que possa ser o mais sustentável relativamente ao clima presente.

Devido ao variado clima na Europa verifica-se que vários países possuem necessidades diferentes para a climatização de edifícios. Países pertencentes ao Norte e Centro utilizam os sistemas geotérmicos essencialmente para aquecimento, visto que o seu clima possui na sua maioria meses frios, fazendo com que o aquecimento seja usado praticamente durante todo o ano, usando apenas o solo para aproveitamento de energia térmica.

Relativamente a países da Europa do sul, o clima não é tao homogéneo como os restantes países, ou seja, é necessário considerar que o período de aquecimento e arrefecimento duram ambos aproximadamente 6 meses, tal como em Portugal, fazendo com que o solo seja fornecedor e recetor de calor.

Na Figura 5, encontram-se descritos as temperaturas médias mensais de dois locais que contêm implementados sistemas geotérmicos, com o objetivo de realçar as diferentes necessidades de climatização relativamente ao clima do centro da Europa e o do sul da Europa (apesar de as temperaturas encontrarem-se em mudança devido às alterações climáticas).

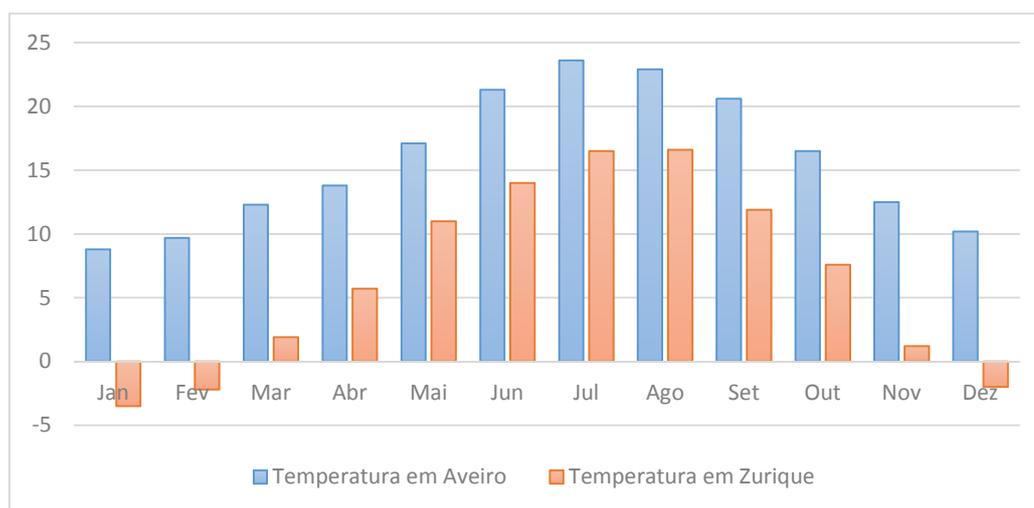


Figura 5. Temperatura média mensal do ar (°C) em dois locais distintos

O uso de sistemas geotérmicos em climas frios mostra a sua eficácia e rentabilidade no que se refere a elementos estruturais, ou seja, como essencialmente é necessário recorrer a estes

sistemas apenas para aquecimento verifica-se que estes provocam menos danos estruturais assim com uma boa conservação de materiais.

Relativamente a climas da Europa do sul, este já não é homogéneo ao longo do ano, ou seja, como é necessário recorrer ao aquecimento e arrefecimento de edifícios denota-se que a estrutura irá ter um comportamento não linear. Quando se procede ao aquecimento de um edifício está-se a aumentar a temperatura do circuito secundário, que se encontra maioritariamente no interior de lajes, provocando deste modo uma dilatação dos materiais pertencentes ao elemento estrutural e consequentemente uma redução da sua resistência. No processo de arrefecimento ocorre o contrário, ou seja, como o circuito secundário possui uma temperatura inferior ao do edifício, provocando uma retração dos materiais fazendo variar a resistência da laje. Esta variação constante de temperatura pode eventualmente provocar danos estruturais, bem como um rápido desgaste relativamente à tubagem do circuito secundário.

Quando se procede ao arrefecimento de edifícios em climas da Europa do sul, torna-se essencial ter atenção relativamente à humidade relativa presente no ar. O clima da Europa do sul possui uma humidade relativa ligeiramente superior a 50%. Tomando como exemplo a cidade de Aveiro, mais precisamente o local de implementação do Edifício CIFICANO verifica-se um valor médio de 61%

Na Figura 6, verifica-se a variação média mensal de humidade relativa na cidade de Aveiro ao longo do ano.

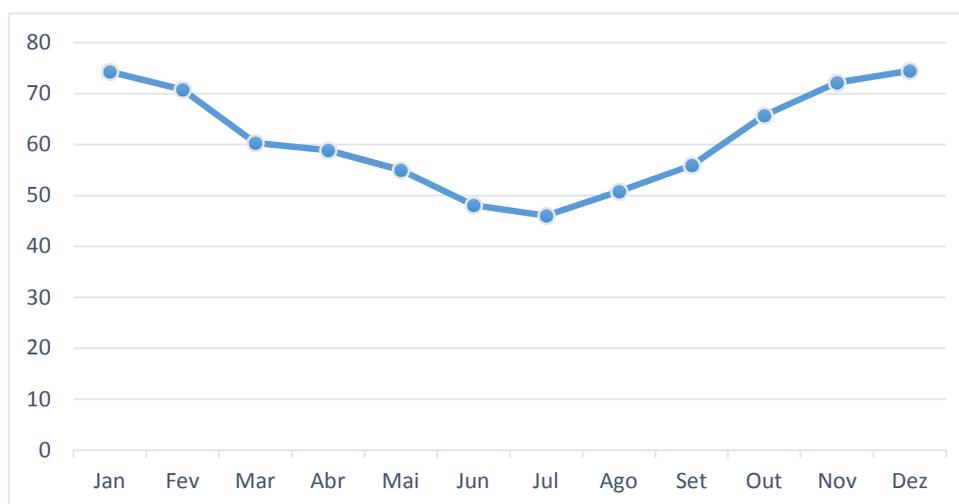


Figura 6. Humidade Relativa (%) na cidade de Aveiro

Quando se procede ao arrefecimento de edifícios é necessário ter em consideração as condensações criadas nas frentes frias, ou seja, quando se realiza a climatização de espaços quentes através de sistemas geotérmicos, é necessário ter em consideração o facto de a laje termoativas estar mais fria que a temperatura ambiente. Esta diferença de temperatura faz com que sejam criadas condensações superficiais devido à humidade relativa presente no ar. Além da humidade relativa, é necessário ter em consideração o fornecimento de calor para o solo (arrefecimento do edifício), algo que em climas do norte da Europa não acontece. Em climas da Europa do sul o fornecimento de calor para o solo é essencial para diminuir a temperatura do interior do edifício. Esta componente ainda não possui grande desenvolvimento nestes climas, apesar de estarem em curso estudos acerca do tema, de modo a compreender o comportamento do solo quando sujeito a elevadas temperaturas

## 2.5. Componente geotécnica

### 2.5.1. Conceito de solo

A definição de solo varia consoante a sua utilização sendo que, no ramo da engenharia o solo consiste num aglomerado de partículas provenientes da decomposição de rocha que podem ser escavados com facilidade. Este solo pode ser utilizado como material de construção (Adobe), material de suporte a estruturas ou como fonte e recetora de calor responsável pela climatização de edifício (geotermia).

Resumidamente, um solo é “formado por partículas minerais que resultam da desintegração física e da decomposição química das rochas podendo também conter matéria orgânica.

Entre partículas sólidas constata-se a existência de espaços vazios ou poros. Estes espaços podem ser preenchidos por ar (solo seco), água (solo saturado) ou pelo conjunto de ar e água (solo parcialmente saturado). O preenchimento do solo é um fator importante a ter em conta no que se refere à geotermia, visto que a existência de água pode colocar em causa toda a eficiência da solução geotérmica.

Assim sendo pode-se considerar que o solo é constituído por 3 fases:

- Sólido (corpo do solo);
- Líquido (água);
- Gasoso (ar).

A existência destas 3 fases possibilita efetuar a determinação das grandezas físicas do solo com o objetivo de compreender o seu comportamento.

No conceito de geotermia, o conhecimento das grandezas do solo permitem a realização de uma solução geotérmica de modo a obter a maior sustentabilidade e eficiência.

### 2.5.2. Nível freático

A presença de água no solo (preenchimento de vazios e poros) deve ser um fator de elevada importância no que se refere à eficiência da solução geotérmica, sobretudo se existir percolação (falta de equilíbrio hidrostático).

É de realçar que a condutividade térmica da água é aproximadamente 22,8 vezes superior ao ar, levando a que o grau de saturação do solo tenha influência de modo significativo relativamente à condutibilidade térmica do solo. [12]

A existência de água em solos pode ser encarada de duas perspetivas distintas, ou seja, a presença deste elemento pode ser benéfico ou prejudicial para o sistema geotérmico.

Quando está-se presente de fluxos de água (percolação), principalmente na situação em que o solo está a receber calor (arrefecimento do edifício) a dissipação de calor poderá afastar-se do elemento termoativo, fazendo com que esta dissipação possa afetar outros elementos termoativos.

Na Figura 7 verifica-se o possível comportamento da dissipação do calor na presença de fluxos de água. Embora o modelo da figura seja realizado para uma parede, este permite obter uma perspetiva do comportamento do solo.

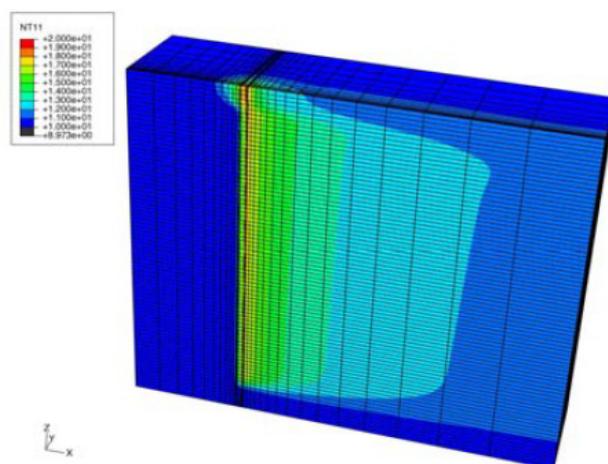


Figura 7. Dissipação de calor do solo sujeito a fluxo de água

É de realçar que quando a percolação é mínima ou quando existe equilíbrio hidrostático, a água pode ser um elemento favorável ao sistema geotérmico, mas apenas em situações de aquecimento do edifício.

Assim sendo torna-se essencial realizar mais estudo com a intenção de obter mais dados referentes ao comportamento do solo quando encontra-se saturado.

### 2.5.3. Propriedades térmicas do solo

As propriedades térmicas são parâmetros fulcrais no que se refere à geotermia sendo que, a textura do solo e os seus componentes podem ser elementos influenciadores relativamente à eficiência da solução geotérmica.

Estudos realizados a diferentes profundidades permitem identificar o comportamento térmico de vários solos, obtendo deste modo conhecimento relativo à difusidade térmica assim a condutibilidades térmica.

Um bom conhecimento térmico do solo permite efetuar uma solução geotérmica eficiente, que possibilita trocas de calor entre solos, assim como, entre os elementos termoativos e o próprio solo.

Assim sendo existem 3 grandes propriedades que devem ser consideradas relativamente às condições térmicas do solo:

- Condutibilidade térmica ( $\lambda$ ) - Consiste numa grandeza física que mede a capacidade de uma substância conduzir calor, permitindo distinguir os materiais consoante a sua condutibilidade. A condutibilidade representa a taxa temporal de transmissão de energia sob a forma de calor através de um material expressa em W/mK. Parâmetros como a  $\rho$  densidade, teor em água e composição mineralógica podem influenciar a condutibilidade do material;
- Calor específico ( $c_p$ ) - O calor específico consiste na quantidade de calor que é necessário fornecer à unidade de massa de uma substância para elevar a sua temperatura de um grau e expressa-se em calorias por grama e por grau. Definem-se calores específicos a pressão constante e a volume constante, representados, respetivamente, por  $C_p$  e por  $C_v$ , ambos dependentes da temperatura;
- Densidade ( $\rho$ ) - Propriedade física do solo expressa em  $\text{Kg/m}^3$ .

É de realçar que a densidade não se trata de uma propriedade térmica, mas sim física, possuindo bastante relevo no comportamento térmico deste.

Os parâmetros identificados anteriormente são importantes no que se refere às propriedades térmicas do solo, em que ambos encontram-se presentes na equação da difusividade térmica (a) do solo.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot cp} \quad (1)$$

A difusividade expressa-se em  $\text{cm}^2/\text{h}$  e descreve a profundidade e velocidade de propagação de uma onda de calor no solo. Com o auxílio de dois pontos de profundidade torna-se possível determinar a difusividade térmica deste.

Na Tabela 1 encontram-se evidenciadas algumas propriedades relativas a materiais distintos

Tabela 1. Propriedades térmicas de alguns materiais [12]

Substância	Condutibilidade térmica	Calor específico	Densidade
	W/m K	W/ m <sup>3</sup> K	Kg/m <sup>3</sup>
Quartzo	8.79	2010	2660
Minerais argila	2.93	2010	2650
Matéria orgânica	0.25	2512	1300
Água	0.57	4186	1000
Gelo	2.18	1884	320
Ar	0.025	1.256	1.25

O conhecimento de todas as propriedades térmicas do solo permite obter o maior rendimento referente à transmissão térmica. O estudo da transmissão de calor é realizado com pressupostos termodinâmicos na medida que respeitam a primeira e segunda lei da termodinâmica, sendo a primeira lei responsável pela conservação de calor e a segunda lei relacionada com a determinação do fluxo de calor.[13]

Em solos a transferência de calor pode ser realizada da seguinte forma:

- Condução;
- Radiação;
- Convecção;
- Processo de vaporização e condensação;
- Troca de iões;
- Ciclos gelo-degelo.

Nem todos os processos referidos contribuem de igual forma para a transmissão de calor no solo. A condução é o fenómeno de transferência que ocorre com maior frequência, apesar

de que as transferências por convecção ocorram mas quando o solo encontra-se sujeito a mudanças de fase de água (vaporização e condensação). Relativamente à radiação, este não é muito significativo para as transferências térmicas do solo. Os ciclos gelo-degelo conseguem transmitir com muita facilidade calor, mas tal processo deve ser evitado junto a estruturas termoativas. [7]

## **2.6. Análise laboratorial**

Para a análise laboratorial foi sugerido a elaboração de um modelo que permita simular trocas de temperatura entre um solo e uma fonte (aquecimento e arrefecimento).

Todos os resultados obtidos a nível de caracterização do solo vão servir para fazer a calibração do modelo numérico para obter uma comparação entre a componente numérica e laboratorial.

Assim sendo, a análise laboratorial será constituída por 3 tarefas:

- Caracterização física do solo;
- Instrumentação do solo com fornecimento de calor (água a 40°C);
- Instrumentação do solo através de refrigeração (água a 10°C).

Com os valores obtidos através de cada ensaio, torna-se possível efetuar uma comparação de valores possibilitando a compreensão do comportamento do solo quando sujeito a variações de temperatura.

## **2.7. Análise numérica**

Para a análise numérica foi sugerido a utilização do programa ANSYS, mais precisamente a ferramenta ANSYS Fluent, com o objetivo de compreender o comportamento do solo quando sujeito a variações de temperatura causadas por uma fonte térmica.

Os requisitos de modelação necessários para a análise numérica são elevados, quer em termos de geometria assim como em propriedades dos materiais. O ANSYS Fluent consiste num programa de elementos finitos sendo uma ferramenta computacional poderosa e flexível para uso geral relativamente à dinâmica de fluidos permitindo modelar o fluxos, turbulências, transferências de calor e reações químicas para as mais variadas geometrias.

Apesar de a ferramenta referida ser mais específica para fluídos, esta foi utilizada em transferências de calor entre uma resistência e um solo, obtendo deste modo uma aproximação da realidade.

Outro fator impulsionador do uso desta ferramenta foi o facto de o Departamento de Engenharia Civil possuir a licença de utilização do programa.

No presente trabalho não foram usados apenas as componentes disponibilizadas pelo ANSYS, usando deste modo outros programas informáticos com o objetivo de simplificar todo o processo de desenho assim como o processo de modelação.

Na Figura 8 encontram-se descritos os programas usados assim como a sua ordem de utilização.



Figura 8. Processo de modelação

Como constata-se na figura anterior o primeiro programa a ser usado é o AutoCAD que permite o desenho da geometria do modelo pretendido para a modelação final. Esta geometria pode ser bidimensional assim como tridimensional.

Ao efetuar o desenho da geometria é necessário ter em consideração todos os fatores geométricos necessários visto que, este programa não permite efetuar uma atualização da geometria em fases posteriores na modelação.

Com a geometria realizada no AutoCAD, procede-se à exportação do desenho para o programa Pointwise.

Pointwise é um software de geração de malhas tridimensionais e bidimensionais que podem ser usados em vários programas de modelação de dinâmica de fluidos (CDF) assim como análise de elementos finitos (FAE).

Neste ponto entra-se no âmbito da elaboração das malhas assim como das condições fronteira, sendo estes dois elementos importantes para a modelação numérica. As malhas a considerar podem ser de dois tipos distintos: estruturais e não estruturais. O que as difere destes dois tipos é o seu aspeto assim como a dificuldade de realização das malhas.

As condições de fronteira têm que obedecer os critérios necessários para a modelação final.

Outra componente possível de executar no Pointwise consiste na atribuição de materiais aos elementos gerados nas malhas, definindo elementos sólidos e líquidos.

Com as malhas geradas e as condições de fronteira estabelecidas, pode-se realizar a exportação para a ferramenta ANSYS Fluent.

O ANSYS Fluent é uma ferramenta que permite a criação de malhas, assim como na verificação de malhas exportadas de outros programas, neste caso do Pointwise. Esta verificação permite clarificar e corrigir possíveis erros criados durante a sua exportação.

O critério de qualidade das malhas deve ser o mais elevado possível, visto que estas devem respeitar diferentes abordagens físicas, ou seja, para a modelação pretendida é necessário malhas de alta qualidade tanto em forma de elementos gerados assim como a sua mudança de tamanho.

Com a malha bem definida torna-se possível atribuir materiais e temperaturas de modo a obter a modelação numérica final.

Na Figura 9 contata-se o método de funcionamento do ANSYS Fluent mostrando 3 fases base do programa assim como a sua ordem (esquerda para a direita).

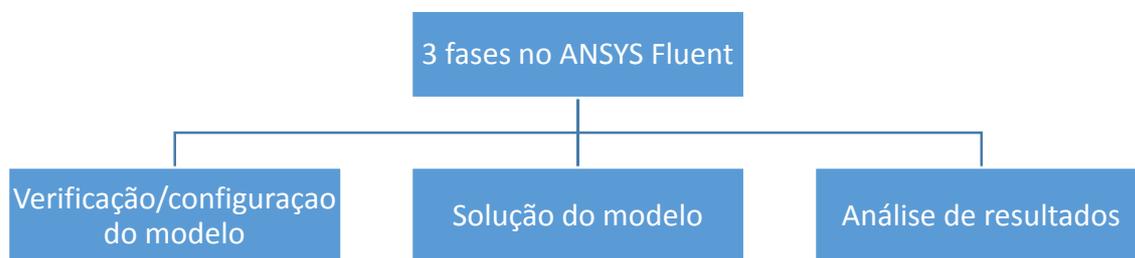


Figura 9. Fases de execução do ANSYS Fluent

### 2.7.1. Equações base

O ANSYS Fluent, para efetuar os cálculos referentes à análise numérica, utiliza uma equação adaptada da equação da transferência de calor descrita pela primeira lei da termodinâmica, ao qual baseia-se o princípio da conservação de energia aplicada para sistemas termodinâmicos. O princípio em questão estabelece a variação de energia de um sistema seja igual à quantidade de energia que o sistema recebe do meio circundante. [14]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\vec{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot \left[ k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\tau_{eff} \cdot \vec{v}) \right] + S_h \quad (2)$$

Em que:

- $k_{eff}$ - Condutibilidade térmica efetiva ( $k + k_t$ );
- $k_{eff} \nabla T$ - Energia transferida pela condução;
- $\vec{J}_j$ - Fluxo de difusão de espécies;
- $\sum_j h_j \vec{J}_j$ - Difusão de espécies;
- $\tau_{eff} \cdot \vec{v}$ - Dissipação viscosa;
- $S_h$ - Volume de calor introduzido.

De acordo com a equação anterior:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \begin{cases} h = \sum_j Y_j h_j \rightarrow \text{gases ideiais} \\ h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \rightarrow \text{gases imcompressíveis} \end{cases} \quad (3)$$

A componente  $Y_j$  representa a fração massa da espécie e a componente  $h_j$  a entalpia sensível que pode ser obtido pela seguinte expressão.

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T C_{p,j} dT \quad (4)$$

Tendo em consideração o tipo de modelo numérico, o ANSYS Fluent possui uma equação própria para resolver este tipo de casos, a equação da energia em regiões sólidas. Esta equação tem como base os seguintes parâmetros:

- $\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) \rightarrow$  Transferencia de energia por convecção;
- $\vec{v} \rightarrow$  Velocidade dada a partir do movimento especificado pela zona sólida;
- $\nabla \cdot (k \nabla T) \rightarrow$  Fluxo de calor provocado pela condução;
- $S_h \rightarrow$  Volume de calor introduzido entre dois sólidos.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (5)$$

Em que:

- $\rho$ - Densidade;
- $h$ - Entalpia sensível;
- $k$ - Condutibilidade térmica

- $T$ - Temperatura;
- $S_h$ - Volume de calor introduzido.

A partir da equação torna-se possível concluir quais os parâmetros importantes a serem introduzidos e controlados para o tipo de modelação em duas dimensões efetuado neste trabalho: a densidade, a entalpia sensível (capacidade térmica), a condutividade térmica, a temperatura e o volume de calor a introduzir.

### 3. ANÁLISE LABORATORIAL

Como fora referido a análise laboratorial será composta por 3 tarefas, sendo a primeira a realização da caracterização de um solo utilizado na instrumentação. Esta caracterização permite obter todas as características físicas referentes a este

De seguida serão realizadas as restantes tarefas, nomeadamente a instrumentação do solo de modo a obter o comportamento do mesmo quando sujeito a variações de temperatura.

Para a análise laboratorial foi requisitado a uma empresa de Construção Civil uma determinada quantidade do solo de modo a permitir a realização de todos os ensaios.

A extração do solo foi efetuado a 3 metros de profundidade, sendo disponibilizado pela empresa aproximadamente 1,20 m<sup>3</sup>, estando representado na Figura 10 dois dos três recipientes de solo.



Figura 10. Solo utilizado para a análise laboratorial

#### 3.1. Caracterização do solo

Para ser efetuada uma caracterização do solo mais completa, teve-se em consideração um conjunto variado de ensaios de modo a compreender as propriedades físicas do mesmo.

Assim sendo para este solo, foram realizados os seguintes ensaios:

- Quantidade de matéria orgânica;
- Teor em água;
- Composição granulométrica;
- Densidade das partículas sólidas e Peso volúmico;
- Limites de Atterberg.

É de realçar que para cada ensaio foi tido em conta todas as indicações normativas de modo a obter mais precisão e exatidão em todos os ensaios.

### 3.1.1. Quantidade de matéria orgânica

Um dos primeiros passos efetuados no que se refere à análise do solo foi a colocação de uma quantidade considerável em estufa de modo a secar o mesmo, possibilitando deste modo a realização de todos os ensaios necessários para a caracterização do solo.

Durante o processo de desagregação com o almofariz, constatou-se a presença significativa de matéria orgânica. Na Figura 11 pode-se evidenciar alguma matéria orgânica encontrado durante a desagregação.



Figura 11. Matéria orgânica encontrada durante a desagregação

Assim sendo, considerou-se importante realizar o ensaio relativo à matéria orgânica, de modo a possibilitar uma quantificação da mesma.

A realização deste ensaio é simples, visto que apenas é necessário estudar uma amostra de solo seco previamente em estufa (100°C), tendo um peso de 5 g. Após esta recolha, a amostra é colocada num forno específico que consegue obter elevadas temperaturas, possibilitando a combustão de toda a matéria orgânica. Deste modo, torna-se possível determinar a quantidade de matéria orgânica presente neste associando o peso do solo antes e depois da combustão. Na Tabela 2 encontram-se descritos todos os valores referentes a este ensaio.

Tabela 2. Quantidade de matéria orgânica presente na amostra

Peso amostra seca (g)	Peso após combustão (g) (430°C)	Peso da matéria orgânica (g)
5,00	4,85	0,15

Tendo em consideração os valores obtidos no ensaio, constata-se que em cada 100g de solo possui-se aproximadamente 2,96 g de matéria orgânica.

O motivo de haver matéria orgânica presente no solo, deve-se ao facto de os terrenos na cidade de Aveiro serem na sua maioria constituídos por aterros, levando a que o solo possa eventualmente ter alguma matéria orgânica a alguma profundidade.

### 3.1.2. Teor em água

O ensaio do teor em água permite a caracterização do peso de água contido em uma determinada quantidade de solo.

No que se refere a este parâmetro considerou-se preponderante efetuar a sua quantificação no momento de receção do solo, assim como durante a realização da compactação do mesmo para a instrumentação.

Este ensaio foi realizado tendo por base o método de secagem em estufa que consiste na determinação do peso da amostra (humidade ambiente) cujo teor em água se quer determinar. De seguida, procede-se à secagem do mesmo em estufa, para que por fim se possa determinar o peso do solo seco.

Com todos os pesos obtidos e com uma razão entre o peso da água e do solo, pode-se obter o valor do teor em água em percentagem, tal como se pode verificar na expressão (6).

$$W = \frac{m_2 - m_1}{m_1 - m_0} \times 100 \quad (6)$$

Em que :

- W- Teor em água;
- $m_0$ - Peso do recipiente vazio;
- $m_1$ - Peso do recipiente vazio + amostra seca;
- $m_2$ - Peso do recipiente vazio + amostra húmida.

Na Tabela 3 encontram-se todos os valores determinados em laboratório relativos ao teor em água no momento de receção do solo

Tabela 3. Teor em água do solo em estudo

m <sub>0</sub> (g)	m <sub>1</sub> (g)	m <sub>2</sub> (g)	W (%)
206,04	819,76	879,36	9,71

Relativamente ao teor em água obtido durante a compactação, este foi determinado diariamente de modo a obter um valor final durante esta atividade. O motivo a ter-se realizado este estudo deve-se ao facto da impossibilidade de realizar esta tarefa toda num só dia, fazendo que de dia para dia o teor em água altera-se devido à temperatura do ar.

É de realçar para este estudo não é necessário secar todo o solo em estufa, visto que esta tarefa iria consumir bastante tempo devido à quantidade de solo utilizado. Na Tabela 4 encontram-se todos os dados referentes ao teor em água durante a compactação do solo.

Tabela 4. Teor em água diário durante a compactação do solo

	m <sub>0</sub> (g)	m <sub>1</sub> (g)	m <sub>2</sub> (g)	W (%)
1º dia	291,32	952,14	1013,2	9,24
2º dia	302,58	897,81	955,45	9,68
3º dia	302,44	1128,45	1202,13	8,92
4º dia	302,44	896,94	953,84	9,57
5º dia	302,44	1078,45	1142,15	8,21
6º dia	302,44	1220,00	1301,53	8,89

Assim sendo o valor médio do teor em água durante a compactação é de 9,08%.

### 3.1.3. Composição granulométrica

A composição granulométrica retrata a distribuição segundo percentagem do peso total das partículas de solo tendo por base a sua dimensão.

Este parâmetro do solo pode ser determinado de duas formas distintas. Para partículas maiores utiliza-se o método convencional da peneiração, enquanto que, para partículas menores utiliza-se o método da sedimentação utilizando o “*SediGraph*”. Combinando estes dois métodos torna-se possível determinar a curva granulométrica do solo em estudo.

Segundo a norma ISO\_TS\_17892-4\_2004 deve-se fazer um pré análise do tamanho máximo das partículas de modo a obter uma determinada quantidade de solo apropriada para análise. Tendo em consideração o solo a analisar conclui-se que este possuía partículas com aproximadamente 15 mm de comprimento, fazendo com que seja necessário analisar uma amostra de solo com um peso mínimo de 2,50 kg.

Com o peso de amostra determinado, pode-se proceder à lavagem do solo de modo a separar os finos e a argila das restantes partículas. Esta separação é realizada com o auxílio de um peneiro com abertura de malha de 0.063 mm. Após a lavagem, o solo retido no peneiro é colocado em estufa para a realização da peneiração, de igual modo o solo lavado é guardado e colocado em estufa para ser analisado através do “*SediGraph*”. Todos os valores associados à lavagem do solo encontram-se descritos na Tabela 5.

Tabela 5. Dados relacionados com a lavagem do solo

Peso de solo antes da lavagem (g)	Peso de solo retido (g) (seco)	Peso de solo passado (g) (seco)
2557,28	1674,60	882,68

Para a análise através da peneiração foram utilizados os peneiros com a abertura estipulada na norma já referida. Com todos os peneiros colocados por ordem decrescente segundo a abertura da malha, pode-se proceder à vibração dos mesmos com o auxílio de um mecanismo vibratório (agitador de peneiros) durante 10 minutos, tal como referido na mesma norma. Com a vibração concluída procede-se ao registo de valores relativos aos pesos das partículas retidas nos peneiros representadas na Tabela 6

Tabela 6. Valores relativos à peneiração do solo

Abertura (mm)	Massa Retidos (g)	%Retidos	%Retidos acumulados	%Passados acumulados
31,50	0,00	0,00	0,00	100,00
16,0	0,00	0,00	0,00	100,00
8,0	58,05	2,27	2,27	97,73
4,0	116,66	4,56	6,83	93,17
2,0	304,20	11,90	18,73	81,27
1,0	441,47	17,26	35,99	64,01
0,500	329,48	12,88	48,87	51,13
0,250	214,16	8,37	57,25	42,75
0,125	127,68	4,99	62,24	37,76
0,063	80,94	3,17	65,41	34,59

No que se refere ao ensaio do “*SediGraph*”, foi pedido ao Departamento de Engenharia Geológica da Universidade de Aveiro realização deste ensaio, ao qual disponibilizaram todos os valores deste, representados na Tabela 7.

Tabela 7. Valores relativos ao ensaio do “*SediGraph*”

Abertura (mm)	%Passados acumulados
0,060	34,42
0,050	33,94
0,040	32,79
0,030	30,37
0,025	28,61
0,020	26,64
0,015	24,53
0,010	22,17
0,008	21,10
0,006	19,89
0,005	19,16
0,004	18,27
0,003	17,02
0,002	15,53
0,0015	14,60
0,0010	13,28
0,0008	12,59
0,0006	11,66
0,0005	10,93
0,0004	10,00
0,0003	8,99
0,0002	7,68
0,0001	5,09

É de realçar que os valores da tabela anterior já se encontram ajustados para a quantidade de solo passado no peneiro 0.063 mm, visto que os valores apresentados pelo “*SediGraph*” consideram que o solo passado neste peneiro representa 100 % da amostra total.

Com a associação dos dois ensaios, torna-se possível realizar a curva granulométrica, representada na Figura 12.

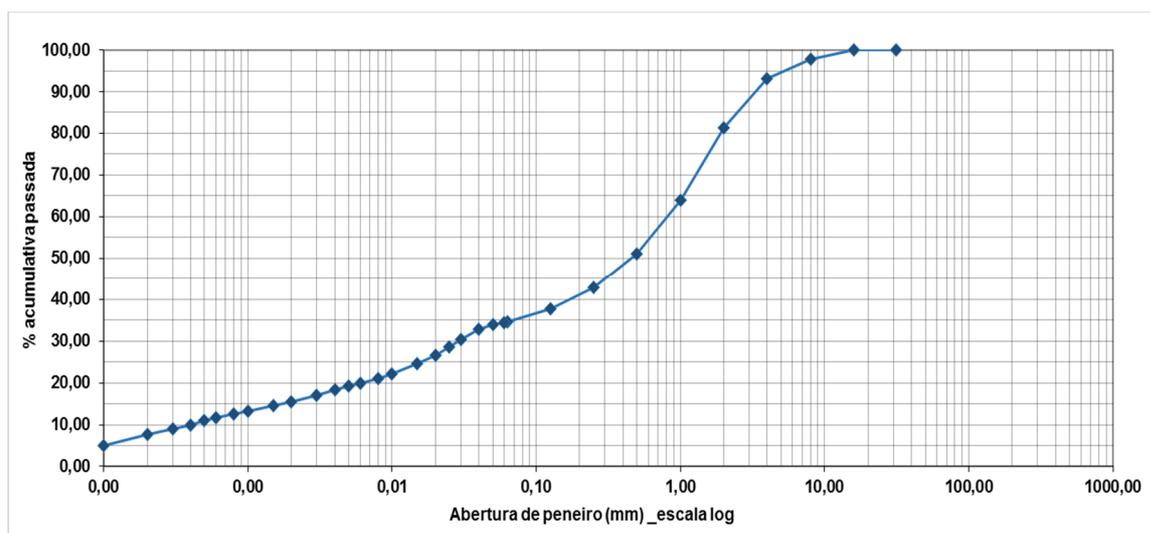


Figura 12. Curva granulométrica do solo em estudo

### 3.1.4. Densidade das partículas sólidas e Peso volúmico

A determinação deste parâmetro relativo ao solo pode ser obtido para um solo seco em estufa ou húmido. Para este caso, teve-se em consideração a utilização do solo seco, colocado previamente em estufa, considerando então para o ensaio o método do picnómetro.

O procedimento experimental deste ensaio é variado, sendo necessário passar por algumas fases para obter todos os valores relativos à caracterização deste parâmetro.

Numa primeira fase, determina-se o peso do picnómetro vazio, colocando-se posteriormente a amostra no interior do mesmo, registando-se o seu peso. Com estes dois passos concretizados procede-se à colocação de água no picnómetro com a amostra e com o objetivo de retirar o ar presente nos vazios mexe-se com uma vareta de vidro de modo a que os vazios sejam ocupados com água.

Com os vazios do solo todos preenchidos pode-se proceder à pesagem do picnómetro com amostra e água. Por fim retira-se a amostra saturada do interior do picnómetro e pesa-se o mesmo cheio de água.

É de realçar que para este ensaio foram utilizados dois picnómetros (picnómetro 8 e picnómetro 22), com o objetivo de obter dois valores de modo a usar a média destes.

Durante o ensaio foi perceptível a existência de matéria orgânica presente no interior do picnómetro proveniente do solo como se constata na Figura 13.

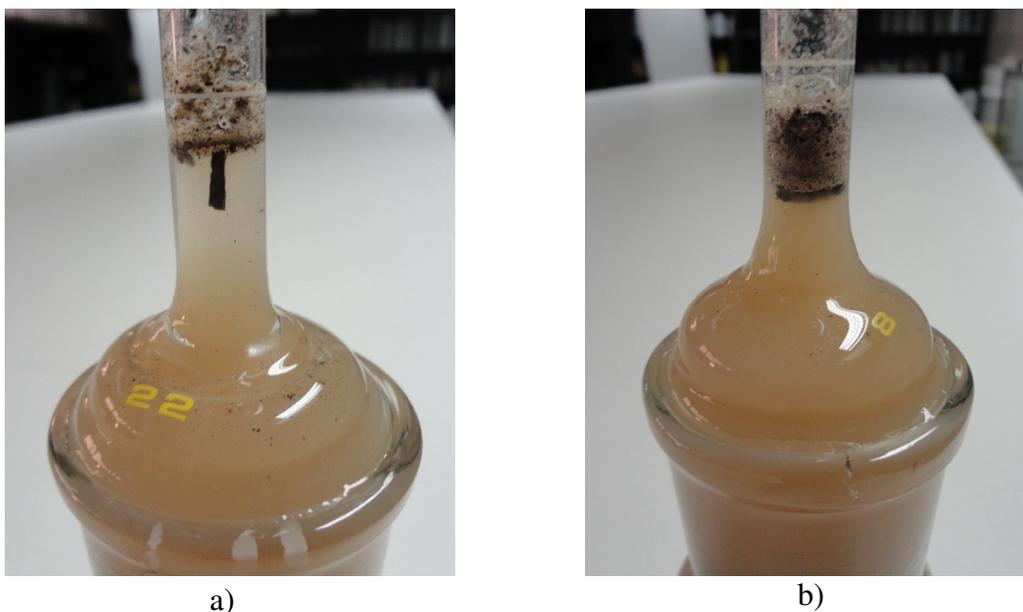


Figura 13. Matéria orgânica nos picnómetros: a) picnómetro 22; b) picnómetro 8

Com todos os dados obtidos e através da expressão representada em (7), procede-se à determinação da densidade das partículas sólidas.

$$\gamma = \frac{m_4}{(m_1 - m_0) - (m_3 - m_2)} \times \gamma_w \quad (7)$$

Em que :

- $\gamma$ - Peso volúmico do material em estudo;
- $\gamma_w$ - Peso volúmico da água;
- $m_0$  – Peso do picnómetro vazio;
- $m_1$  – Peso do picnómetro vazio + água;
- $m_2$  – Peso do picnómetro vazio + amostra de solo;
- $m_3$  – Peso do picnómetro vazio + amostra de solo + água;
- $m_4$  – Peso de amostra de solo.

Na Tabela 8 encontram-se todos os dados obtidos através da análise laboratorial, assim como os valores referente ao peso volúmico determinado para cada picnómetro.

Tabela 8. Caracterização do peso volúmico do solo em estudo

Referência	$m_0$ (g)	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	$m_3$ (g)	$m_4$ (g)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
Picnómetro 8	207,32	580,53	369,08	681,10	161,76	25,93
Picnómetro 22	273,53	611,53	373,43	696,73	135,90	26,30

Assim sendo, e tendo em consideração os dois valores obtidos para os picnómetros, considerar-se-á um peso volúmico de 26,12 kN/m<sup>3</sup>.

Relativamente à densidade das partículas sólidas (Gs), obtém-se o valor de 2,66, visto que este valor resulta da divisão o peso volúmico do solo ( $\gamma$ ) pelo peso volúmico da água ( $\gamma_w$ ).

### 3.1.5. Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg correspondem apenas à fração de solo que passa no peneiro nº4 (4,75 mm). Deste modo foi peneirado uma determinada quantidade de solo com o objetivo de obter 200 gramas deste passado no peneiro já descrito.

#### 3.1.5.1. Limite de Liquidez

O limite de liquidez poder ser determinado através de dois métodos distintos, ou seja, pode-se usar o método da concha de Casagrande ou o fall-cone test. Assim sendo, de entre os dois ensaios, optou-se pelo método da concha da Casagrande.

O procedimento experimental deste ensaio é simples, visto que é colocada uma pasta de solo sobre a concha de Casagrande, em que de seguida com uma peça apropriada (riscador), cria-se um sulco separando a pasta em duas metades. Devido ao mecanismo presente no equipamento a concha é levantada e deixada cair várias vezes. O movimento repetido criado pelo mecanismo irá criar uma união nos sulcos, e quando este tiver cerca de 1cm de extensão, pode-se dar por concluído o ensaio.

Concluído o ensaio, procede-se à extração de solo na zona da união e coloca-se numa taça para obter-se o valor do teor em água.

O limite de liquidez é assim determinado através de uma interpolação entre diversos ensaios e o número de pancadas. É de realçar que este ensaio é efetuado 4 vezes tendo em cada ensaio um teor em água diferente de modo a obter dois ensaios com menos de 25 pancadas e outros dois com mais de 25 pancadas.

Na Figura 14 encontra representado as diferentes fases do ensaio da concha da Casagrande.

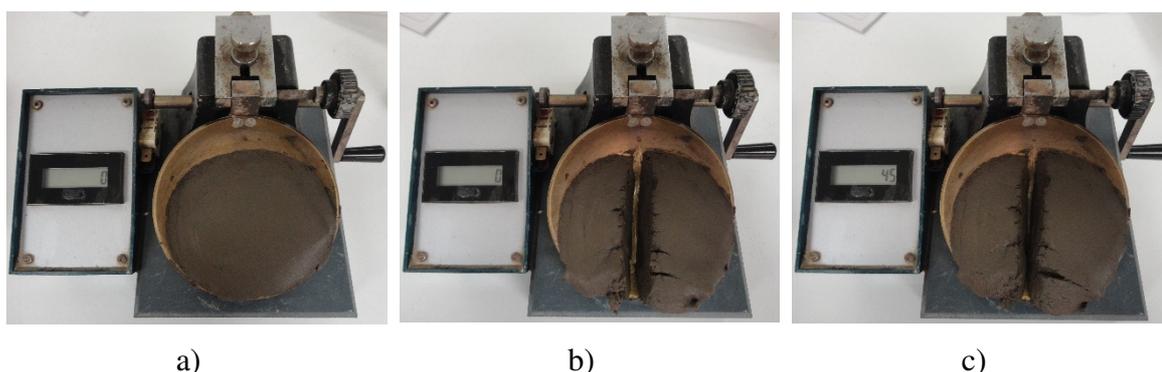


Figura 14. Procedimento de ensaio: a) colocação da pasta; b) criação do sulco; c) união das duas metades (fim do ensaio)

Ainda relacionado com este ensaio, encontram-se demonstradas na Tabela 9 todos os pesos obtidos, assim como o número de pancadas para cada teor em água. É de realçar que não foi explicado neste tópico o procedimento de determinação do teor em água, visto que já se encontra retratado no subtópico “Teor em água”.

Tabela 9. Resultados obtidos no ensaio da concha da Casagrande

Recipiente	m <sub>0</sub> (g)	m <sub>1</sub> (g)	m <sub>2</sub> (g)	W (%)	Pancadas
L1	49,50	57,65	60,10	30,06	7
L2	48,21	58,06	60,87	28,53	14
L3	47,68	59,58	62,77	26,81	26
L4	48,53	61,01	64,12	25,16	45

Com o teor em água determinado e o número de pancadas para cada ensaio, pode-se então realizar uma regressão linear, de modo a obter o teor em água para 25 pancadas (valor de referencia). É de notar que este teor em água representa o limite de liquidez obtido para as 25 pancadas.

Na Figura 15 encontra-se representado a regressão linear assim como a sua equação.

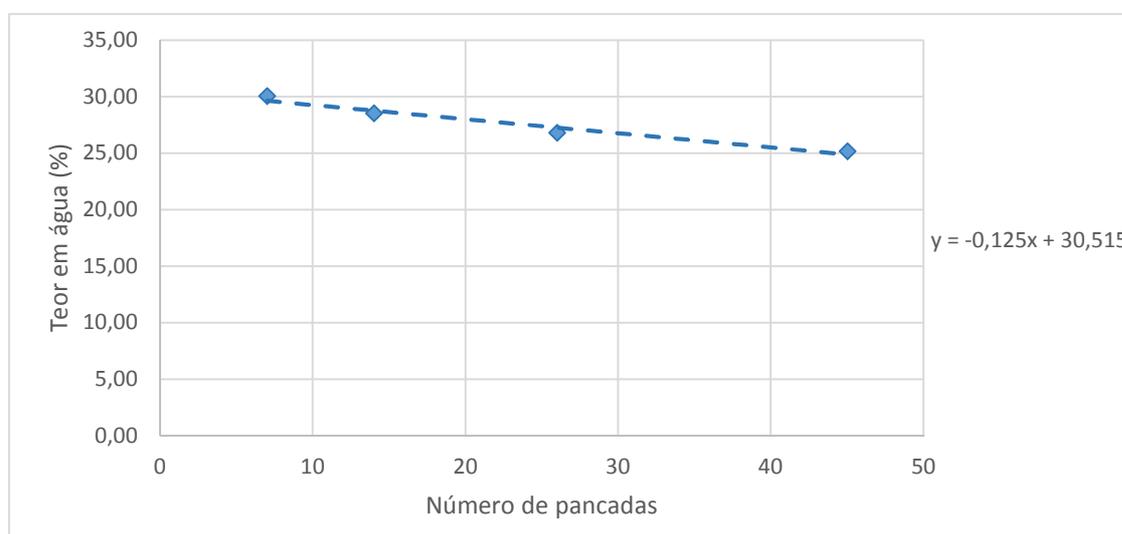


Figura 15. Relação entre o teor em água e o número de pancadas

Tendo em conta a equação obtida pela regressão e o valor padrão de 25 pancadas, obtém-se o valor de 27,39 para o limite de liquidez.

### 3.1.5.2. Limite de Plasticidade

Para o limite de plasticidade é preparada uma pasta de solo (solo + água) à qual se moldam a partir dela 4 amostras com formato esférico e com volume semelhante.

A partir das amostras formadas, rola-se cada uma entre a palma da mão e uma placa de vidro, com pressão suficiente para transformar o formato esférico num filamento cilíndrico. Quando o filamento possui aproximadamente 3 milímetros de espessura, torna-se a formar uma esfera e repete-se a criação do filamento. A partir do momento em que na formação do

filamento ocorre rotura, quando o seu diâmetro possui aproximadamente a dimensão referida, pode-se dar por concluído o ensaio. Assim sendo, coloca-se o filamento numa taça previamente pesada e coloca-se na estufa para poder ser determinado o teor em água.

É de realçar que quando ao formar a esfera, esta não se molde com facilidade e se veja logo pontos de rotura, pode-se considerar que o solo já passou o limite plástico e já não pode ser usado para o ensaio, fazendo com que seja criado novas amostras para começar com novos ensaios.

O limite de plasticidade do solo é então a média dos teores em água determinados para as 4 amostras estando representado na Tabela 10 todos os dados obtidos em laboratório. Tal como fora referido anteriormente, a explicação da determinação do teor em água encontra-se descrito no subtópico “Teor em água”.

Tabela 10. Dados obtidos para o cálculo do limite de plasticidade

Recipiente	m <sub>0</sub> (g)	m <sub>1</sub> (g)	m <sub>2</sub> (g)	W (%)
P1	71,28	72,60	72,81	15,91
P2	68,74	69,84	70,05	19,09
P3	61,75	62,97	63,22	20,49
P4	73,05	74,37	74,62	18,94

Assim sendo e tendo em consideração a média das 4 amostras, tem-se um limite de plasticidade de 18,61.

### 3.1.6. Classificação do solo

Após a realização de todos os ensaios referentes às propriedades físicas do solo, torna-se possível proceder à sua classificação. De entre todas as possibilidades, considerou-se essencial classificar o solo através da classificação unificada segundo a norma ASTM D 2487-85, que atribui símbolos e nome de grupos aos materiais analisados em laboratório.

Primeiramente, torna-se essencial verificar se o solo é um solo grosso ou fino. Uma vez que este apresenta, através da curva granulométrica, 64,79 % de material retido no peneiro n° 200 (abertura de malha de 0.075mm), pode-se considerar que este é um solo grosso.

De seguida verifica-se a quantidade de solo passado no peneiro n° 4 (abertura de malha de 4,75 mm) com objetivo de compreender se este solo é cascalho ou areias. Como o solo apresenta 94,02 % de passados no referido peneiro, pode-se considerar que este pertence ao grupo das areias.

Por fim, verifica-se a quantidade de finos presentes no solo, sendo que esta verificação é realizada através da análise de solo passado no peneiro com abertura de malha de 0.425 mm. Como se pode verificar na curva granulométrica o solo apresenta 48,61 % de passados no referido peneiro, fazendo com que este tenha a designação de SC (areia argilosa).

É de realçar que segundo a norma este solo necessita de dois símbolos para poder ser classificado, visto que os finos possuem a sua classificação.

Como o limite de liquidez assume valores de 27,39% e o índice de plasticidade um valor de 8,78, considera-se que os finos possuem designação CL. Assim sendo, o solo é classificado de SC CL ( areia argilosa de argila magra).

Denote-se que ainda não foi realizada a classificação do solo no que se refere aos índices de vazios, visto que serão necessários dados referentes à compactação do solo. Assim sendo, os dados referentes ao índice de vazios encontram-se descritos no tópico denominado de “Índice de vazios”.

## **3.2. Instrumentação do solo**

A instrumentação a realizar nesta dissertação será composta por duas fases. Primeiramente será analisado o aquecimento do solo sendo que numa segunda fase, será estudado o comportamento sujeito a baixas temperaturas (arrefecimento), simulando deste modo o processo de arrefecimento e aquecimento realizado por um edifício.

Para se realizar esta instrumentação foi necessário conceber um modelo experimental que permitisse obter a melhor comparação possível a um sistema geotérmico implementado em um edifício, simulando deste modo todo o processo envolvido neste tipo de sistemas.

### **3.2.1. Modelo experimental**

Para realizar-se a instrumentação desejada, foi necessário a elaboração de um modelo experimental, possibilitando deste modo a realização de todos os ensaios pretendidos, assim sendo, este modelo é composto pelos seguintes materiais:

- Reservatório (Tanque) - 1,50x1,00x1,00 (m);
- Placas de isolamento (XPS) – 15 cm de espessura;
- Tubagem em PEX-a (Ø12 mm);
- Proverte de betão (Ø0.15x0.36 m);

- Plástico;
- Manta geotêxtil;
- Material de medição de temperatura (9 termopares, datalogger, computador);
- Bomba;
- Fonte de aquecimento de água (Banho-maria);
- Tubagem auxiliar responsável pelo transporte de água;
- Tubagem para uma futura saturação do solo.

Antes de se proceder à montagem do modelo com os materiais referidos, foi necessário fazer um estudo da posição de todos os seus componentes, sendo realizado com a ferramenta AutoCAD todos os planos (plantas e cortes) para a elaboração do mesmo. Na Figura 16 encontra-se a primeira planta idealizada para o auxílio da montagem do modelo experimental.

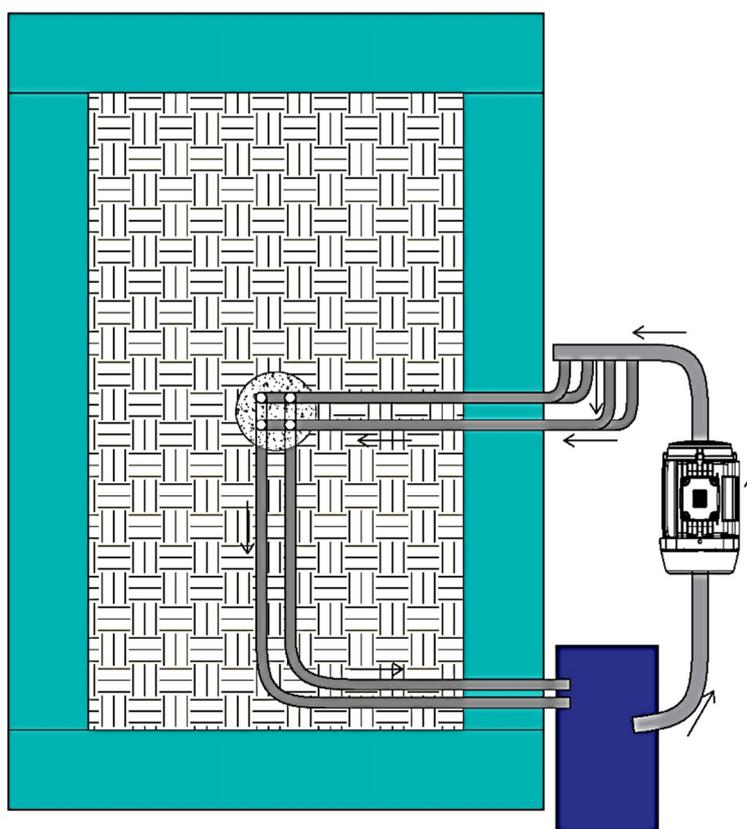


Figura 16. Primeira planta idealizada para a instrumentação

Como se verifica na figura anterior, foi idealizado primeiramente que a tubagem que passa no interior do provete sairia pela base deste, passando pelo solo até sair do tanque usado na

instrumentação. Com o início da montagem do modelo experimental considerou-se que os planos adotados não eram os mais aconselhados, fazendo com que fosse necessário modifica-los. Na Figura 17 encontra-se a planta final executada de auxílio à montagem do modelo experimental. É de realçar que no ANEXO 1 encontram-se todos os elementos realizados em AutoCAD.

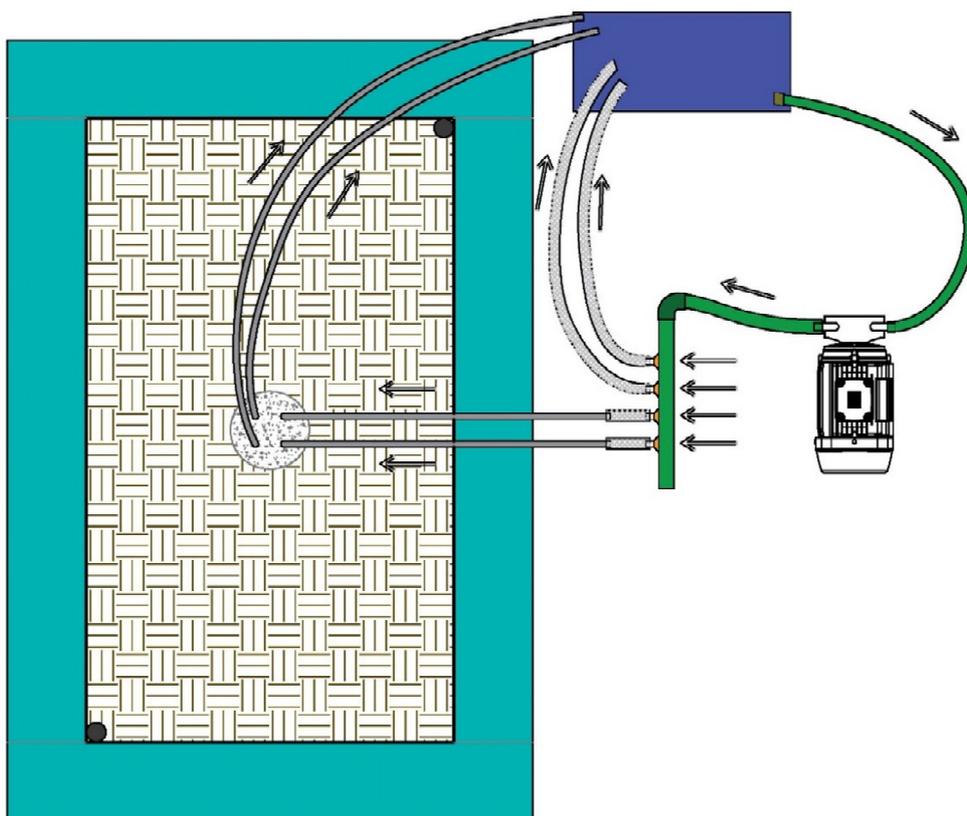


Figura 17. Planta realizada em AutoCAD do modelo experimental

Com o auxílio dos respetivos planos procedeu-se à montagem do modelo experimental. Primeiramente isolou-se o tanque com placas de XPS, de modo a evitar quaisquer trocas de calor entre o solo e o exterior, evitando deste modo anomalias nos resultados obtidos. Este isolamento foi colocado na base, nas laterais e no topo do tanque.

Como se vai realizar numa fase posterior um ensaio em que o solo se encontra saturado, considerou-se relevante a colocação de um plástico com o objetivo de evitar que a água responsável pela saturação se espalhe pelo tanque provocando trocas de calor indesejáveis. Visto que a conservação do estado do plástico era importante, considerou-se pertinente a colocação de uma manta geotêxtil (na base) por cima deste, evitando assim possíveis orifícios durante a compactação.

No que se refere à saturação do solo teve-se em consideração a colocação de dois tubos nas extremidade do tanque com o objetivo de saturar de baixo para cima. Estes tubos encontram-se perfurados (diâmetro do orifício de 7 mm) com espaçamento de 10 cm e estão revestidos por uma manta geotêxtil de modo a evitar que o solo obstrua os orifícios responsáveis pela saturação. Esta opção foi tomada, porque ao saturar o solo deste modo, pode-se ter uma maior percepção de quando este se encontra completamente saturado visto que a água terá a tendência de vir à superfície, e quando chegar a essa altura já se saberá que este se encontra saturado.

Com estes elementos colocados no interior do tanque, procedesse à compactação do solo. Esta compactação consistiu na colocação de cerca de 5 centímetros de solo, ao qual foi compactado manualmente com o auxílio de um pilão com um peso aproximado de 7 kg.

De modo a obter uma boa compactação do solo, realizou-se 3 passagens do pilão ao longo do tanque, estas passagens encontram-se demonstradas na Figura 18. É de realçar que ao longo das passagens o solo compactava em média cerca de 3 centímetro, ou seja, a cada 5 centímetros de solo, 3 centímetros eram compactados fazendo com que a cada compactação se subisse praticamente 2 centímetros de altura.

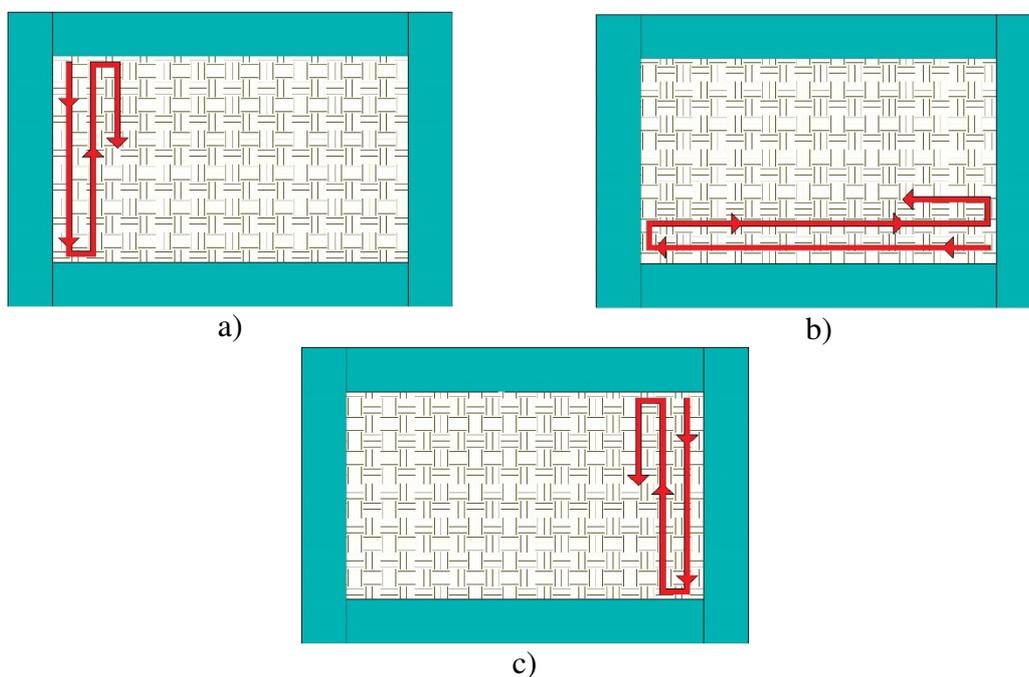


Figura 18. Sequência de passagem do pilão no solo em planta: a) 1ª passagem; b) 2ª passagem; c) 3ª passagem

Com o intuito de simular uma estaca de betão como fonte de calor, teve-se em consideração a utilização de um provete de betão (dimensões) já executado no laboratório. Esta

reutilização do provete consistiu em realizar uma carote de modo a possibilitar a passagem de toda a tubagem responsável pelo aquecimento deste. O motivo de se ter aproveitado o provete já concretizado em laboratório, deve-se ao facto de que ao realizar um novo, o tempo de secagem do betão iria ser grande, podendo ocorrer possíveis atrasos na elaboração do modelo experimental. Na Figura 19 verifica-se o provete utilizado, assim como a carote realizada com um diâmetro 110 milímetros.



Figura 19. Provete de betão utilizado no modelo experimental

Com a carote executada, procede-se à colocação de 4 secções de tubagem Pex-a responsáveis pelo transporte de água quente no interior do provete. De seguida, realizou-se a betonagem do provete de modo a colmatar o espaço vazio deixado entre este e a tubagem inserida. Na Figura 20 verifica-se o provete pronto para ser betonado em que no seu interior já possui a tubagem em necessária.



Figura 20. Provete pronto para ser enchido por betão

Como o processo de caroteamento é realizado ao longo de todo o provete, sentiu-se a necessidade de criar uma cofragem para a base de modo a possibilitar a betonagem. Tal como se pode verificar na figura anterior, esta cofragem foi concebida em XPS, de modo a permitir que a tubagem colocada no provete possa perfurar este, com o objetivo de se ter tubagem não embebida em betão para se realizar todas as ligações necessárias ao transporte de água.

Para que a tubagem no interior do provete não ficasse ligeiramente arqueada, foi colocada no topo deste um espaçador em XPS que permitiu ter a tubagem direita, assim como obter um espaçamento constante ao longo do elemento de betão.

Após a betonagem, foi necessário aguardar 3 dias para que o betão colocado no provete estivesse parcialmente seco, de modo a permitir o seu manuseamento para se realizar todas as ligações necessárias relativamente à tubagem.

As ligações foram realizadas através de acessórios em cotovelo, que permitiam unir tubagem colocada previamente na cofragem de XPS. Na Figura 21 encontram-se demonstradas as uniões realizadas, assim como os acessórios utilizados.



Figura 21. Ligação das tubagens no interior do provete

Por fim, de modo a completar o provete, este foi betonado novamente mas na zona em que foram executadas as ligações fazendo com que a tubagem não fique em contacto direto com

o solo. É de realçar que todas as modificações realizadas no provete só influenciaram a sua altura passando de 30 centímetros para 36 centímetros, mantendo assim o diâmetro da base de 15 centímetros.

Relativamente ao sistema de bombagem presente no modelo instrumental, foi utilizado uma bomba com um caudal de 23l/min, segundo o fabricante da mesma. De modo a confirmar as especificações da bomba foi realizado um simples teste que consiste em medir a quantidade de água bombeada pela bomba ao longo de 1 minuto. Este teste revelou que a bomba apenas tinha um caudal de 13l/min.

Como o provete possui 2 tubos que recebem água proveniente da bomba, houve a necessidade de criar um acessório que permitisse abastecer os dois tubos através de uma única saída de bomba. Para se evitar problemas de pressão nas uniões entre a tubagem do provete e o acessório, foi criado sobre este 4 saídas em que 2 vão para o provete e as restantes voltam para o banho-maria. Esta consideração permite dividir o caudal em 4 parcelas, fazendo com que a água circule no provete a uma velocidade mais reduzida. Na Figura 22 constata-se o sistema de bombagem usado no modelo.



Figura 22. Sistema de bombagem usado no modelo experimental

Após a compactação de todo o solo, procede-se à colocação da tampa do modelo em XPS, para evitar trocas de calor entre o solo e o exterior. Com a colocação deste elemento de isolamento já se pode executar as eventuais ligações do sistema de bombagem à tubagem presente no provete de betão para se poder dar por concluída a montagem do modelo experimental representado na Figura 23. É de realçar que no Anexo 2 a 4 encontra-se o registo fotográfico da montagem da instrumentação.



Figura 23. Modelo experimental

#### 3.2.1.1. Considerações

Para a realização da compactação do solo, foi utilizado 1140,52 Kg de solo, totalizando o volume disponível de 0,68 m<sup>3</sup>.

Com os dois dados referidos, pode-se proceder à determinação da densidade aparente do solo compactado, em que associada a quantidade de material usado com o volume ocupado pelo mesmo. Assim sendo, o solo possui uma densidade aparente de 1,67 g/cm<sup>3</sup>.

Com a densidade aparente determinada, torna-se possível efetuar a quantificação do índice de vazios do solo compactado.

### 3.2.2. Índice de vazios

O índice de vazios é um parâmetro de caracterização de um determinado material que apresenta a razão entre o volume de vazios e o volume de matéria sólida em estudo.

No que se refere ao comportamento térmico do solo, é expectável que este fator possua considerável importância associada à transmissão de calor, ou seja, quanto menor for o índice de vazios, maior será a interação de partículas do solo, fazendo com que a propagação de calor ocorra com maior facilidade.

Assim sendo para a determinação deste parâmetro foi utilizada a equação (8) que de modo simplificado relacionada a densidade aparente com a densidade real do solo.

$$e = \frac{\rho_R - \rho_A}{\rho_R} \times 100 \quad (8)$$

Em que:

- e – Índice de vazios;
- $\rho_R$  – Densidade real do solo;
- $\rho_A$  – Densidade aparente do solo.

Tendo em conta todos os valores obtidos anteriormente, verifica-se que o solo compactado possui um índice de vazios de 37,22%.

### 3.2.3. Processo de aquecimento do solo

O processo de aquecimento do solo consistiu em criar um modelo experimental que fosse o mais similar a um sistema geotérmico implementado em um edifício real em situação de arrefecimento do mesmo, normalmente utilizado durante as estações quentes (Verão).

#### 3.2.3.1. Procedimento experimental

Numa situação real ter-se-ia como fonte de calor o edifício, que provoca um aumento de temperatura do circuito secundário, em que com o auxílio de uma bomba de calor reversível este calor é transmitido para o circuito primário provocando deste modo trocas de temperatura com o solo, fazendo com que a temperatura deste aumente e a temperatura do circuito primário diminua.

No modelo experimental em causa, foi utilizado um equipamento com termostato que permite manter a temperatura da água de forma constante, simulando deste modo o edifício fornecedor de calor. O equipamento utilizado possui a designação de banho-maria.

Para esta instrumentação foi estabelecida uma temperatura no banho-maria de 40°C.

Com o auxílio de uma simples bomba procedeu-se ao transporte da água desde do banho-maria para o elemento de betão possibilitando deste modo o aquecimento deste e uma eventual troca de calor entre o provete de betão e o solo em estudo. Este procedimento simula as trocas de calor que existem entre uma fundação termoativa e o solo responsável pelo arrefecimento do edifício.

Denote-se que este sistema pode ser considerado um sistema autónomo, ou seja, com a água a passar no betão, esta vai diminuir de temperatura, fazendo que quando chegue ao banho-maria esta tenha uma temperatura inferior 40°C. Como o equipamento usado possui uma resistência, este manterá a temperatura sempre constante, fazendo com que quando a água presente no banho-maria diminuía dos 40°C este ligue e aqueça a água de volta à temperatura estabelecida.

É de realçar que o registo de dados teve início apenas a partir do momento em que o banho-maria começou a trabalhar, fazendo com que haja circulação de água à medida que esta ia aquecendo, permitindo assim obter uma melhor simulação do que acontece no interior de um edifício.

Relativamente ao registo de dados, foi estabelecido que esta seria realizada minuto a minuto, permitindo deste modo obter um maior controlo do comportamento do solo em estudo na instrumentação.

### **3.2.3.2. Análise de resultados**

Com todos os valores obtidos torna-se possível efetuar um estudo relativo ao comportamento do solo relativamente ao seu aquecimento. Na Figura 24, estão representados todos os dados obtidos através de cada sensor.

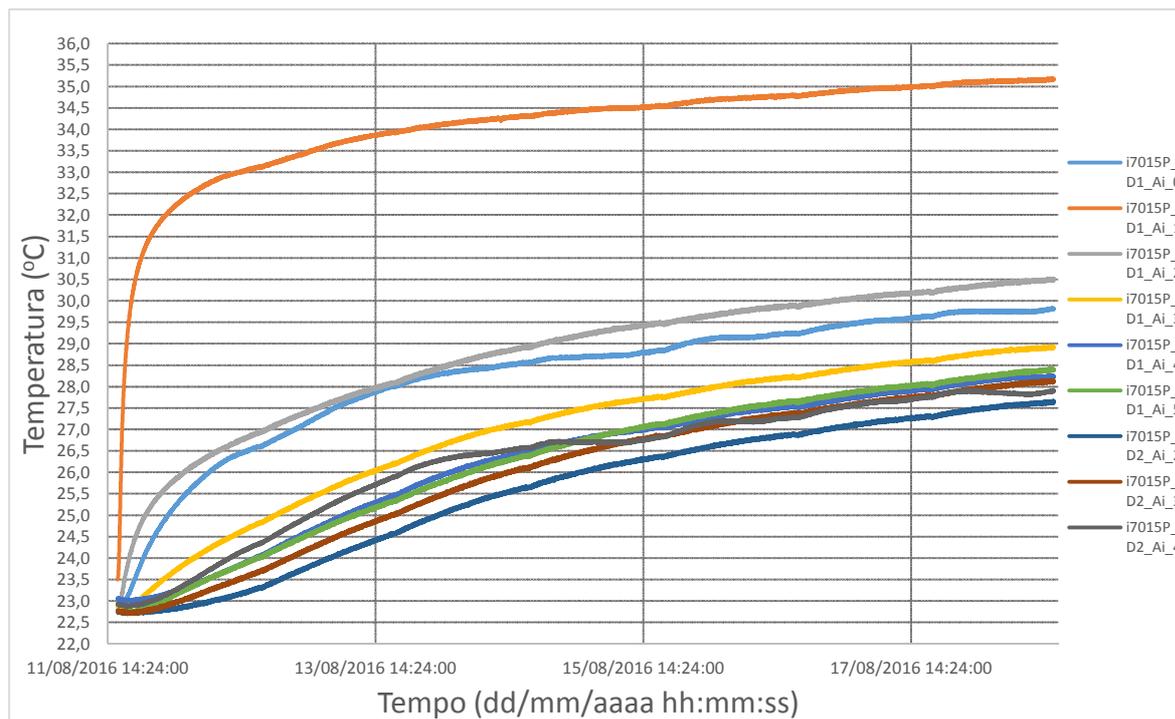


Figura 24. Fase de aquecimento do solo

Denote-se que a instrumentação apenas foi realizada em 7 dias, não tendo o solo nem o elemento de betão estabilizado a temperatura estabelecida no banho-maria. Isto deve-se ao facto de que ao sétimo dia de instrumentação as variações de temperatura registadas eram cada vez mais pequenas. Como se pode verificar na figura anterior o declive das curvas tende a diminuir com o passar do tempo, mostrando que a homogeneização da temperatura ocorreria ao fim de algum tempo.

Como seria o mais expectável, e tendo em consideração a figura anterior, constata-se que o betão possuiu uma reação mais rápida referente à variação de temperatura imposta na instrumentação (linha laranja), sendo que por sua vez o solo possuiu uma resposta mais lenta. Apesar de o solo possuir uma reação mais lenta relativamente à variação de temperatura, verifica-se que, em sensivelmente dois pontos de medição, a temperatura aumentou mais rapidamente que no restante solo. É de notar que estes dois sensores são os que se encontram mais próximos da fonte de calor (linha cinzenta e azul claro).

Este comportamento por parte do solo faz com que seja necessário ter em consideração a resistência térmica que este possui, ou seja, a resistência térmica representa o inverso da condutibilidade térmica e caracteriza a propriedade dos materiais que mede a dificuldade de condução de calor através dos mesmos, sendo medido em  $K \cdot m/W$ .

Assim sendo e de modo simplificado, torna-se mais fácil fornecer um aumento de temperatura a um corpo a um centímetro de distância da fonte de calor do que a 50 centímetros e, conseqüentemente, quanto maior for a distância para a fonte de calor, mais complicado se torna a propagação de calor.

Como se verifica na figura anterior, a maior variação de temperatura ocorre no sensor que se encontra a 5 centímetros da fonte de calor. Por sua vez, a segunda maior variação de temperatura ocorre a 19 centímetros da fonte, o que faz com que haja 14 centímetros de solo a criar uma resistência térmica criando assim uma diferença de temperatura distinta entre este dois pontos.

Na Figura 25 verifica-se as temperaturas iniciais e finais da instrumentação em alguns pontos de medição de modo a comprovar a resistência térmica que o solo possui.

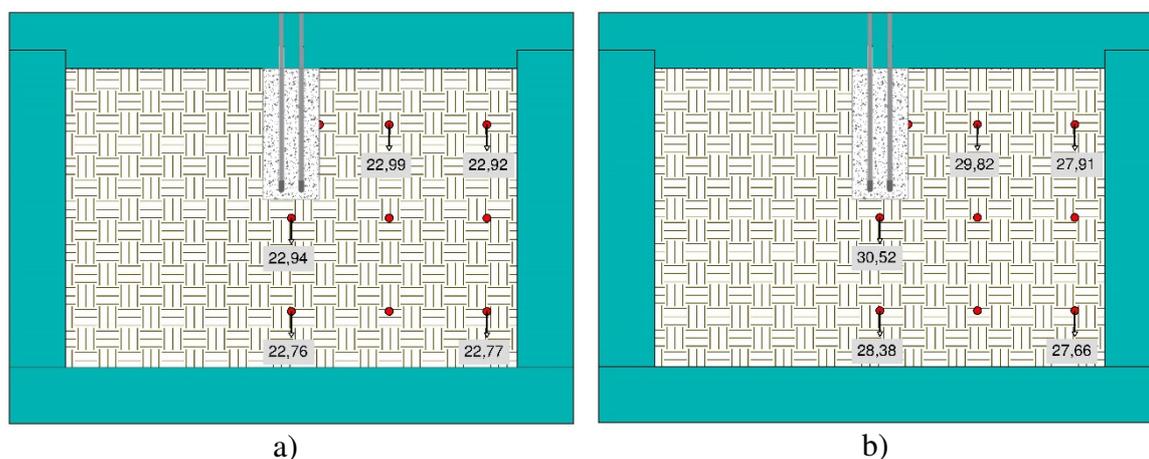


Figura 25. Temperaturas em alguns pontos da instrumentação: a) iniciais; b) finais

Tendo em conta os resultados obtidos através da instrumentação, pode-se afirmar que a distância entre elementos termoativos deve ser um elemento importante referente às propriedades térmicas do solo, ou seja, quanto mais próximo estejam estes elementos mais calor o solo receberá pondo em causa o sistema geotérmico implementado.

Se o calor recebido pelo solo proveniente de elementos termoativos seja por excesso, este acaba por saturar, fazendo com que não consiga captar mais temperatura de modo a dissipar. Considerando as medições realizadas por um dos sensores mais afastado da fonte de calor (i7015\_iD2\_Ai\_4), torna-se possível compreender o pressuposto comportamento do solo caso nesta instrumentação existisse das fontes de calor exatamente à mesma distância.

No fim da instrumentação realizada, este ponto de medição registava uma diferença de temperatura 4,99°C. Se houvesse uma nova fonte de calor com exatamente as mesmas

propriedades, este ponto de medição estaria teoricamente a registar um diferencial de temperatura de 9,98°C, passando deste modo a ser o dobro do que foi instrumentado. De modo simplificado encontra-se representado na Figura 26 o possível comportamento do solo quando sujeito a duas fontes de calor iguais.

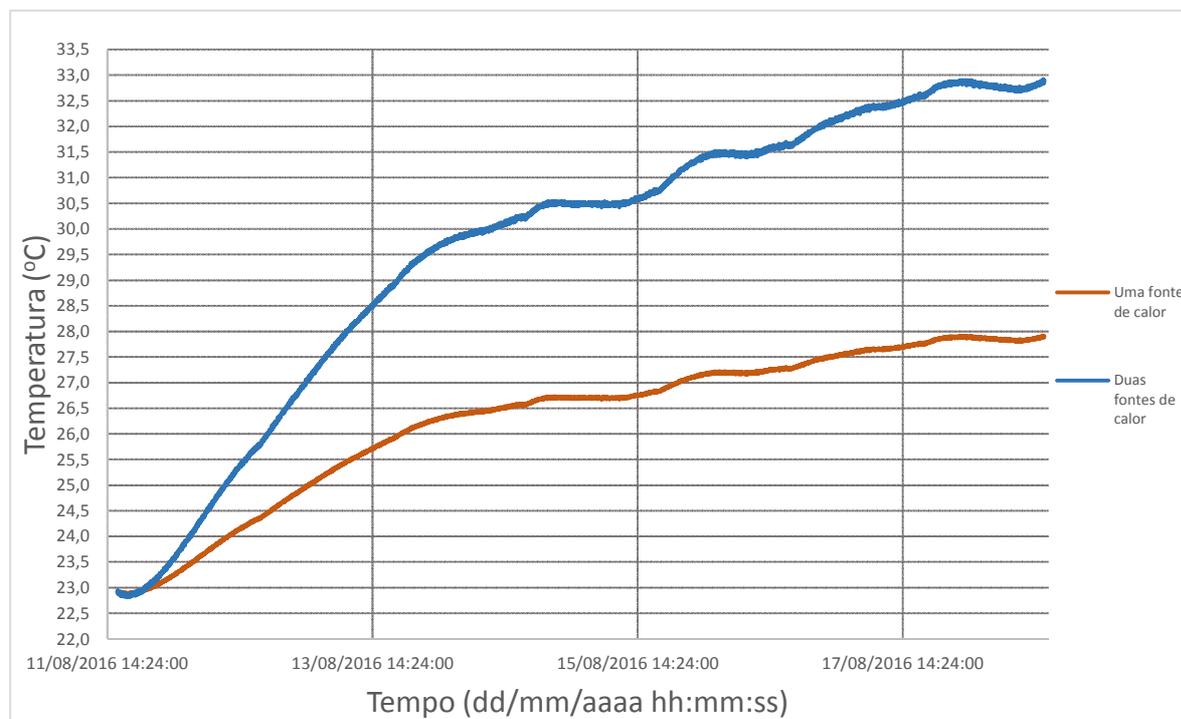


Figura 26. Comportamento teórico do solo sujeito a duas fontes de aquecimento iguais

Assim sendo, a proximidade de fundações termoativas pode provocar a saturação do solo, colocando em causa toda a solução geotérmica, fazendo com que a distância entres estes elementos seja um fator de bastante relevo.

Como fora referido, ao fim do sétimo dia de instrumentação, deu-se por concluído o procedimento de aquecimento do solo, fazendo com que fosse possível compreender o comportamento deste relativamente à dissipação de calor, estando na Figura 27 todos os dados referentes a este estudo.

É de realçar que o fim da instrumentação consistiu em desligar o banho-maria, assim como a bomba responsável pelo transporte de água.

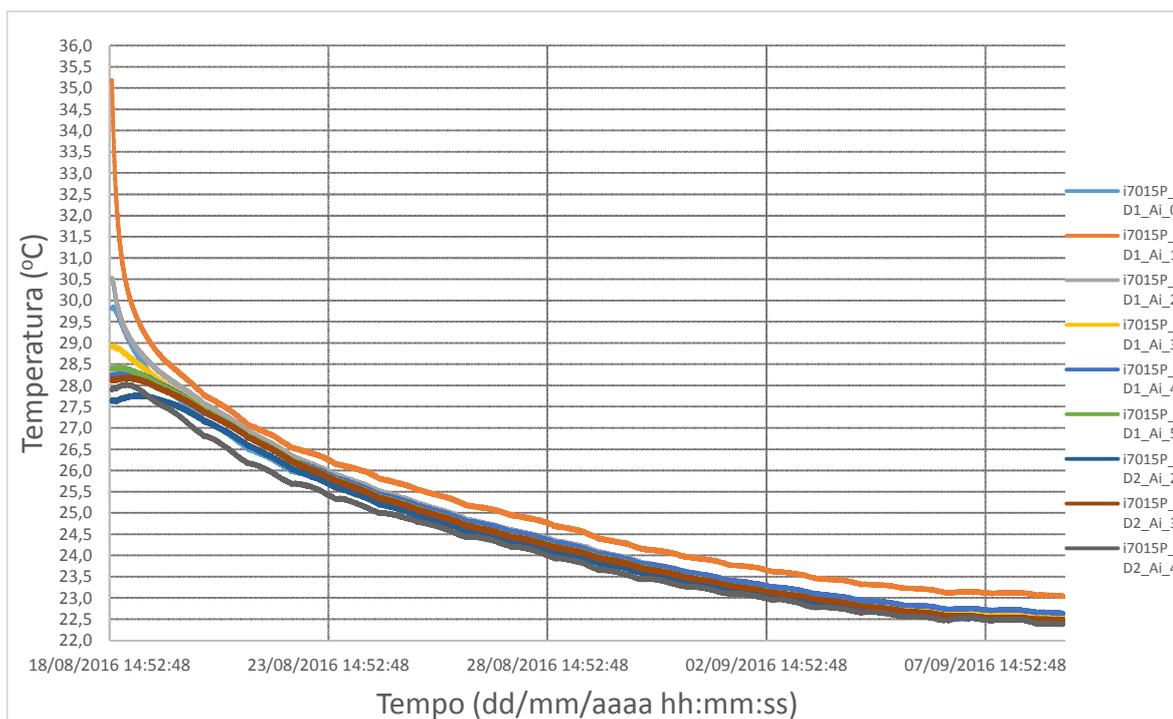


Figura 27. Dissipação de calor do solo

A partir do momento que é desligado o banho-maria, verifica-se que a temperatura do betão começou instantaneamente a diminuir, enquanto que, o solo só começou a ter uma diminuição de temperatura poucos momentos depois. Como se pode verificar na figura anterior o processo de arrefecimento é um pouco semelhante ao aquecimento, em que o solo mais próximo da fonte de calor possui uma maior variação de temperatura nos primeiros instantes, ao contrário do solo mais afastado do elemento de betão. Aliás, o solo mais afastado possui ainda um ligeiro aumento de temperatura resultante do aquecimento deste.

O comportamento do solo e do betão, ao fim de um determinado tempo, tende a ser semelhante relativamente à dissipação de calor, ou seja, como se verifica na figura anterior, apesar de o betão sofrer uma variação de temperatura maior que o solo na fase inicial, este tende a homogeneizar a temperatura da mesma modo que o solo.

Ao contrário do que foi realizado para a fase de aquecimento, a dissipação de calor foi realizada em 23 dias, possibilitando assim que a temperatura final da instrumentação fosse igual à inicial. Assim sendo, encontra-se na Tabela 11 evidenciadas as temperaturas do solo e do betão no instante inicial da instrumentação, assim como a temperatura máxima e temperatura final.

Tabela 11. Temperaturas registadas durante a instrumentação (°C)

	I7015P_ iD1_Ai_0	I7015P_ iD1_Ai_1	I7015P_ iD1_Ai_2	I7015P_ iD1_Ai_3	I7015P_ iD1_Ai_4	I7015P_ iD1_Ai_5	I7015P_ iD2_Ai_2	I7015P_ iD2_Ai_3	I7015P_ iD2_Ai_4
T <sub>inicial</sub>	22,99	23,50	22,94	22,90	23,05	22,76	22,77	22,76	22,92
T <sub>Máx</sub>	29,85	35,12	30,53	28,94	28,34	28,44	27,79	28,20	28,04
T <sub>Final</sub>	22,56	23,04	22,62	22,52	22,64	22,48	22,40	22,49	22,40

Como se verifica na tabela anterior, a temperatura final da instrumentação é ligeiramente inferior à inicial, uma vez que nos últimos dias da instrumentação a temperatura do ar em Aveiro sofreu uma diminuição na ordem dos 10 °C, podendo deste modo ter influenciado muito ligeiramente a temperatura do solo.

Outro fator de alguma relevância a ser analisado seria a comparação das diferenças de temperatura ao sétimo dia de dissipação de calor e das diferenças de temperatura no fim do fornecimento de calor. Esta comparação serviria para verificar se a dissipação de calor ocorrer de uma forma mais lenta que o fornecimento. Assim sendo, encontra-se na Tabela 12 todos os dados referentes ao fornecimento e dissipação de calor ao sétimo dia.

Tabela 12. Comparação de variações de temperatura a 7 dias de instrumentação (°C)

	I7015P_ iD1_Ai_0	I7015P_ iD1_Ai_1	I7015P_ iD1_Ai_2	I7015P_ iD1_Ai_3	I7015P_ iD1_Ai_4	I7015P_ iD1_Ai_5	I7015P_ iD2_Ai_2	I7015P_ iD2_Ai_3	I7015P_ iD2_Ai_4
$\Delta T_{\text{aque}}^1$	6,83	11,68	7,58	6,01	5,17	5,62	4,89	5,36	4,99
$\Delta T_{\text{dissi}}^2$	-4,80	-9,63	-5,32	-3,82	-3,06	-3,28	-2,73	-3,05	-3,12

1 – Diferença de temperatura na fase de aquecimento; 2 – Diferença de temperatura na fase de dissipação de calor

Analisando os resultados, constata-se que a dissipação de calor ocorrer mais lentamente que o fornecimento. É de realçar que o modelo experimental é pouco diminuto relativamente às dimensões do tanque, ou seja, para ter-se mais certeza relativamente a este parâmetro, o ideal seria ter um modelo com dimensões maiores para simular com mais precisão o que ocorre na realidade com um sistema geotérmico.

### 3.2.4. Processo de refrigeração do solo

O método de refrigeração do solo consistiu em criar o mesmo procedimento que é usado por um sistema geotérmico em situação de aquecimento do edifício, normalmente utilizado durante as estações frias (Inverno), sendo o solo a fonte de calor e o edifício o elemento a aquecer.

### 3.2.4.1. Procedimento experimental

O procedimento experimental desta componente da instrumentação é um pouco semelhante ao realizado para a fase de aquecimento do solo. Neste caso, o pretendido é simular o processo de aquecimento de um edifício em que a fonte de calor seria o solo e o elemento a aquecer seria o edifício com o sistema geotérmico implementado.

O princípio deste modelo simula o fornecimento de baixas temperaturas por parte do edifício ao circuito primário, que por sua vez a bomba de calor reversível transmite estas temperaturas ao circuito primário de modo a provocar trocas de calor com o solo, fazendo com que a temperatura do solo diminua mas a temperatura do circuito primário aumente de modo a possibilitar a climatização do edifício.

No modelo experimental em causa não foi possível utilizar o banho-maria como fonte de refrigeração da água, visto que este equipamento apenas permite aquecer líquidos contidos no seu interior. Assim sendo, este equipamento serviu apenas como reservatório à água usada na instrumentação, visto que ao possuir algum isolamento nas suas paredes, este possibilita um melhor controlo da temperatura na água desejada.

Para a realização da instrumentação foi estabelecido que a temperatura da água teria um valor de 10°C. Na impossibilidade de usar-se equipamentos de refrigeração de água, foi estipulado que a temperatura da água seria controlada através da adição de gelo.

Ao contrário do que foi referido na instrumentação anterior, em que a instrumentação era autónoma, esta por outro lado não era autónoma fazendo com que seja necessário ter um controlo rigoroso da temperatura da água.

Com o decorrer da instrumentação verificou-se uma grande dificuldade em manter a temperatura de 10°C, fazendo com que fosse estabelecido uma tolerância neste parâmetro de  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Esta dificuldade encontrava-se no facto de que quando a água passava no elemento de betão, esta recebia calor por parte do solo, levando a que a temperatura do banho-maria fosse alterada. Além deste fator deve-se ter em consideração os ganhos de temperatura relacionados com o transporte da água nas tubagens, provocando nestas condensações, tal como se verifica na Figura 28.



Figura 28. Formação de condensações durante o transporte da água

Denote-se que foram medidas as temperaturas máximas e mínimas ao longo do dia da instrumentação sendo a máxima de 25,3°C (durante a tarde) e a mínima 21,2°C (durante a noite).

Devido ao fornecimento constante de gelo, delimitou-se que o tempo da instrumentação seria de apenas 24 horas, visto que era necessário adicionar constantemente 1kg de gelo de meia em meia hora, sendo impossível concretizar a instrumentação por muito tempo, sendo necessário vigia da instrumentação permanentemente.

É de realçar que esta instrumentação apenas foi concretizada à terceira tentativa, visto que nas restantes existiu a dificuldade de obter uma quantidade de gelo adequada ao caso de estudo, dificultando assim a obtenção de uma temperatura constante.

#### **3.2.4.2. Análise de resultados**

Com todos os valores obtidos através da aquisição de dados torna-se possível efetuar um estudo relativo ao comportamento do solo. Figura 29, estão representados todos os dados obtidos através de cada sensor ao fim das 24 horas.

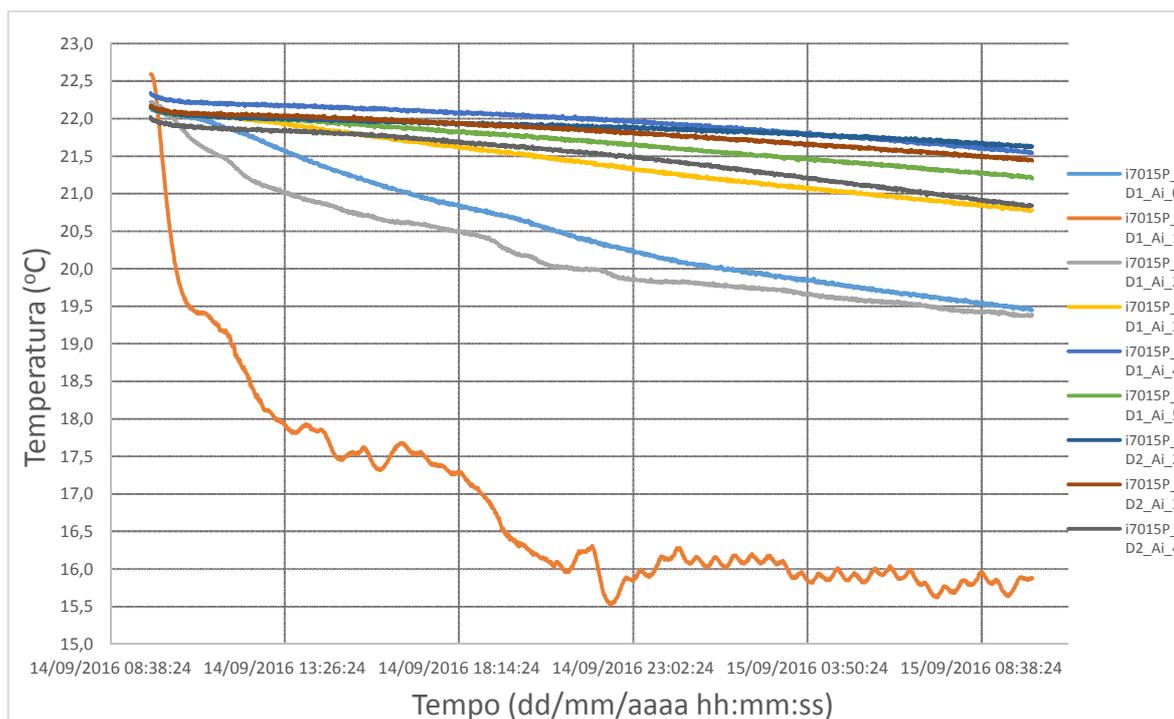


Figura 29. Fase de refrigeração do solo

Como seria de esperar o betão (linha laranja) foi o que obteve uma variação de temperatura mais rápida comparativamente ao solo em estudo. Observando esta mesma linha no gráfico, constata-se de algumas oscilações de temperatura. Estas provêm da dificuldade de estabelecer a temperatura pretendida.

Apesar de o solo possuir uma reação mais lenta à variação de temperatura, constata-se que em dois pontos de mediação, esta variação foi mais acentuada que nos restantes sensores (linha cinzenta e azul claro). Este fenómeno ocorrido remete novamente para a resistência térmica que o solo possui, tal como havia acontecido para a instrumentação de aquecimento do solo em que este apresenta uma maior variação de temperatura a uma distância de 5 centímetros da fonte calorífica e uma menor a 19 centímetros da mesma.

Esta diferença de distâncias faz com que exista entre estes dois pontos 14 centímetros de solo, responsável por realizar uma grande quantidade de resistência térmica.

Na Tabela 13 encontra-se descritos os valores correspondentes às variações de temperatura, assim como as temperaturas iniciais e as finais registadas na instrumentação para cada sensor utilizado.

Tabela 13. Dados obtidos através das 24 horas de instrumentação

	I7015P_ iD1_Ai_0	I7015P_ iD1_Ai_1	I7015P_ iD1_Ai_2	I7015P_ iD1_Ai_3	I7015P_ iD1_Ai_4	I7015P_ iD1_Ai_5	I7015P_ iD2_Ai_2	I7015P_ iD2_Ai_3	I7015P_ iD2_Ai_4
T <sub>inicial</sub>	22,14	22,59	22,22	22,15	22,34	22,14	22,15	22,17	22,02
T <sub>Final</sub>	19,45	15,88	19,38	20,78	21,54	21,20	21,63	21,44	20,84
$\Delta T$	-2,69	-6,71	-2,84	-1,37	-0,80	-0,94	-0,52	-0,73	-1,34

Como fora realizado para a instrumentação de aquecimento do solo, encontra-se na Figura 30 as temperaturas iniciais e finais da instrumentação em alguns pontos de medição, com o objetivo de reforçar o conceito de resistência térmica que o solo possui.

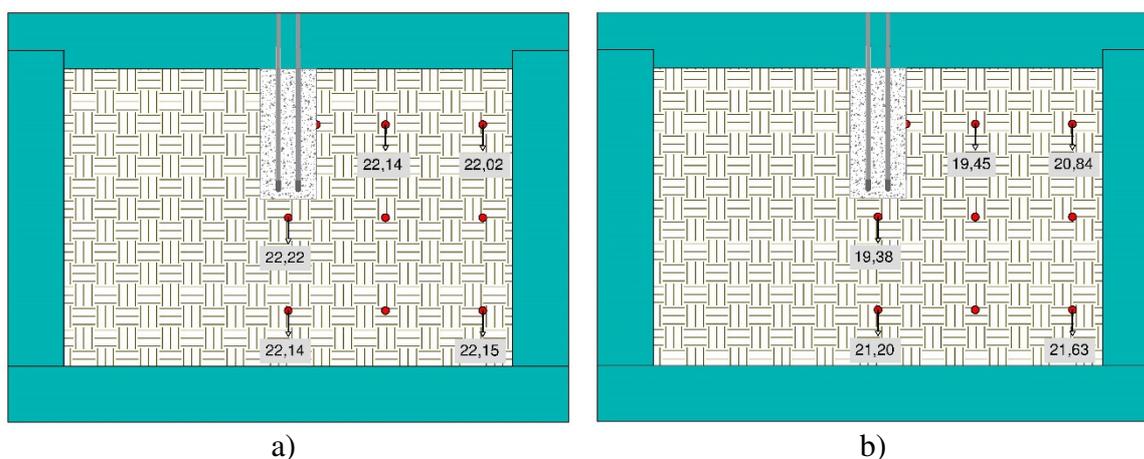


Figura 30. Temperaturas em alguns pontos da instrumentação: a) iniciais; b) finais

Considerando os dados obtidos através da instrumentação deve-se ter em conta o fator da distância entre elementos termoativos devido às propriedades térmicas do solo, de modo a não colocar em causa o sistema geotérmico implementado em um determinado edifício.

Se a variação de temperatura do solo for demasiada, pode-se ter em casos extremos, o fenómeno de congelamento de solos, podendo este causar danos ao sistema geotérmico, assim como a elementos de suporte.

Assim como foi realizado para a fase de aquecimento, teve-se em consideração as medições realizadas por um dos sensores mais afastado da fonte de refrigeração (i7015\_iD2\_Ai\_4), possibilitando deste modo a compreensão do pressuposto comportamento do solo quando sujeito a duas fontes de refrigeração com exatamente as mesmas características, estando estas à mesma distancia do ponto de medição.

Ao fim da instrumentação de 24 horas, o ponto de registo possuía uma variação de temperatura de  $-1,18^{\circ}\text{C}$ , caso houvesse uma segunda fonte de refrigeração este ponto teoricamente possuiria uma variação de  $-2,36^{\circ}\text{C}$ , passando a ser o dobro do que foi registado

em laboratório. De modo simplificado, encontra-se representado na Figura 31 o possível comportamento do solo quando sujeito a duas fontes de refrigeração iguais.

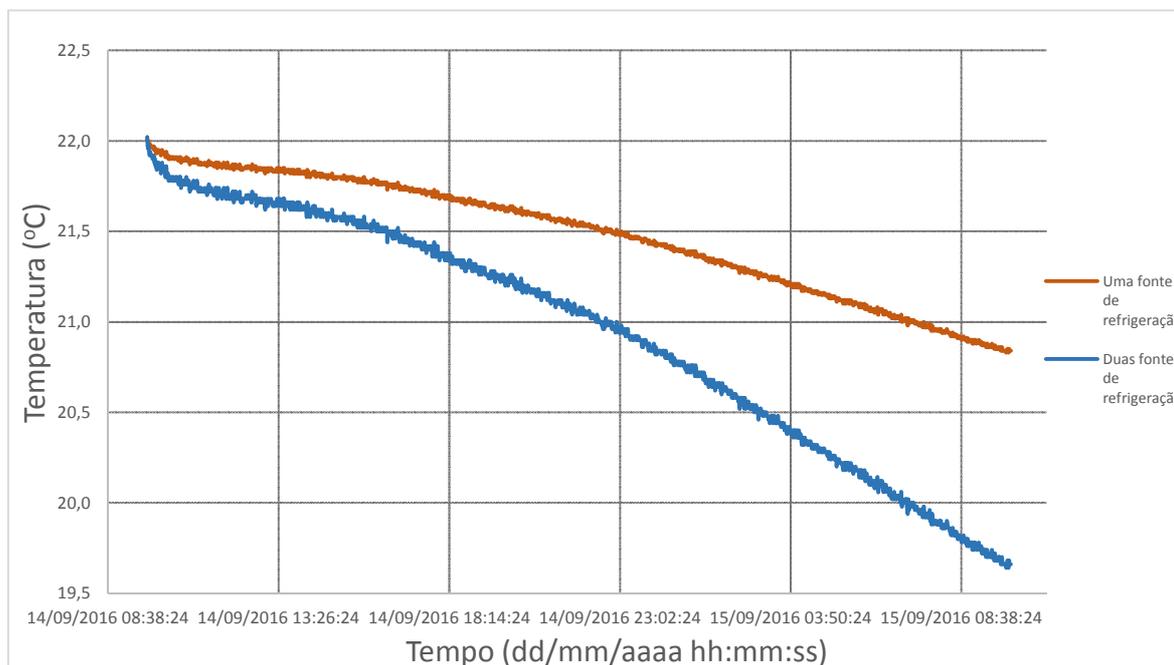


Figura 31. Comportamento teórico do solo sujeito a duas fontes de refrigeração iguais

Tendo em conta a pouca quantidade de resultados para análise considera-se que a proximidade de elementos termoativos, em casos extremos, pode provocar uma eventual congelação do solo. Contudo este facto não é tao previsível em climas da Europa do Sul, visto que a temperatura do ar não atinge valores tão baixos, de modo que seja necessário fornecer ao solo temperaturas responsáveis pelo seu congelamento. Por sua vez em climas da Europa do Norte, esta realidade encontra-se bem presente tendo em consideração o seu clima, visto que estes países conseguem fornecer ao solo temperaturas negativas, responsáveis pelo congelamento do mesmo.

Nestes casos basta ter um elemento termoativo para colocar em causa todo o sistema geotérmico, não sendo necessária uma eventual segunda fonte de refrigeração para congelar o solo.

### 3.2.5. Velocidade de propagação da onda de calor

A velocidade de propagação da onda de calor é outro parâmetro a ter em consideração relativamente ao comportamento do solo a variações de temperatura.

É de realçar que o ideal para a análise deste parâmetro seria ter uma variação de temperatura instantânea da fonte térmica, para que esta não possuísse influência no que se refere ao comportamento do solo às variações de temperatura impostas.

Assim sendo, para este parâmetro apenas foi considerado os primeiros instantes da instrumentação para analisar o comportamento do solo, assumindo deste modo que a fonte térmica possui uma reação instantânea às variações de temperatura desejadas.

### 3.2.5.1. Velocidade durante o aquecimento do solo

Para a análise deste parâmetro relativamente ao aquecimento do solo, estipulou-se uma variação de temperatura em todos os pontos de medição de aproximadamente um grau, fazendo com que a temperatura delimitadora seja de 24°C. Na Figura 32 encontram-se os dados referentes a este estudo assim como a delimitação da temperatura.

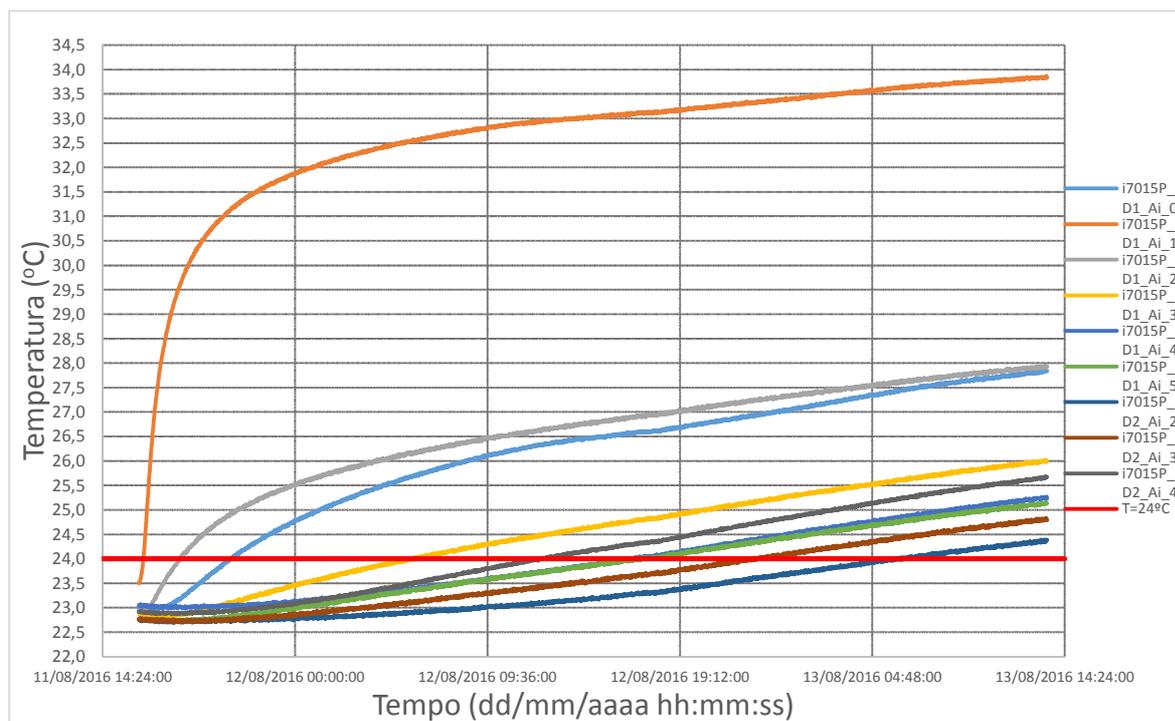


Figura 32. Delimitação da temperatura para a velocidade de propagação (aquecimento)

Estabelecido o valor de 24°C torna-se possível realizar uma análise relativamente à velocidade de propagação da onda de calor. Para a determinação deste parâmetro tem-se em consideração o quociente entre a distância de cada ponto de medição de temperatura à fonte térmica e o tempo que demorou aquele determinado ponto a chegar aos 24°C.

Tendo em conta o formato da fonte térmica, considerou-se pertinente considerar como distância a cada ponto de medição a média das distâncias da face considerada, ou seja, considerou-se as distâncias às extremidades do provete assim como a distância ao centro deste. Na Tabela 14 encontram-se os valores referentes à velocidade de propagação da onda de calor, tendo em conta dados registados na instrumentação em cada sensor.

Tabela 14. Velocidade de propagação da onda de calor em cada sensor

Sensor	Tempo (min)	Tempo (s)	Distância <sup>1</sup> (m)	Velocidade (m/s)
i7015P_iD1_Ai_0	277	16620	0,2599	$1,5641 \cdot 10^{-5}$
i7015P_iD1_Ai_2	124	7440	0,0767	$1,0317 \cdot 10^{-5}$
i7015P_iD1_Ai_3	824	49440	0,3276	$6,6272 \cdot 10^{-6}$
i7015P_iD1_Ai_4	1469	88140	0,4940	$5,6049 \cdot 10^{-6}$
i7015P_iD1_Ai_5	1493	89580	0,3061	$3,4176 \cdot 10^{-6}$
i7015P_iD2_Ai_2	2292	137520	0,6281	$4,5674 \cdot 10^{-6}$
i7015P_iD2_Ai_3	1834	110040	0,4478	$4,0694 \cdot 10^{-6}$
i7015P_iD2_Ai_4	1199	71940	0,4857	$6,7520 \cdot 10^{-6}$

1 – Esta distância representa uma média ponderada das distâncias das extremidades do provete e zona central ao sensor em causa.

Apesar dos dados não serem muito conclusivos devido às condições do ensaio, constata-se que quanto maior é a distância do ponto de mediação à fonte térmica, menor é a velocidade de propagação da onda de calor. A diminuição desta velocidade pode ser devida à inércia térmica que o solo possui, servindo deste modo de travão à propagação de calor.

### 3.2.5.2. Velocidade durante a refrigeração do solo

Assim como foi realizado para a fase de aquecimento do solo, estipulou-se uma temperatura com o objetivo de obter o tempo que o solo demora a chegar ao valor estipulado.

Para que fosse possível comparar valores entres as duas instrumentações (aquecimento e refrigeração do solo) considerou-se aproximadamente a mesma diferença de temperatura ( $\Delta T=1^{\circ}\text{C}$ ). Assim sendo o valor de referência de temperatura considerado para que fosse possível realizar a análise da velocidade de propagação foi de 21,75 graus. Na Figura 33 encontram-se os dados referentes a este estudo, onde se encontra delimitado a temperatura já referida.

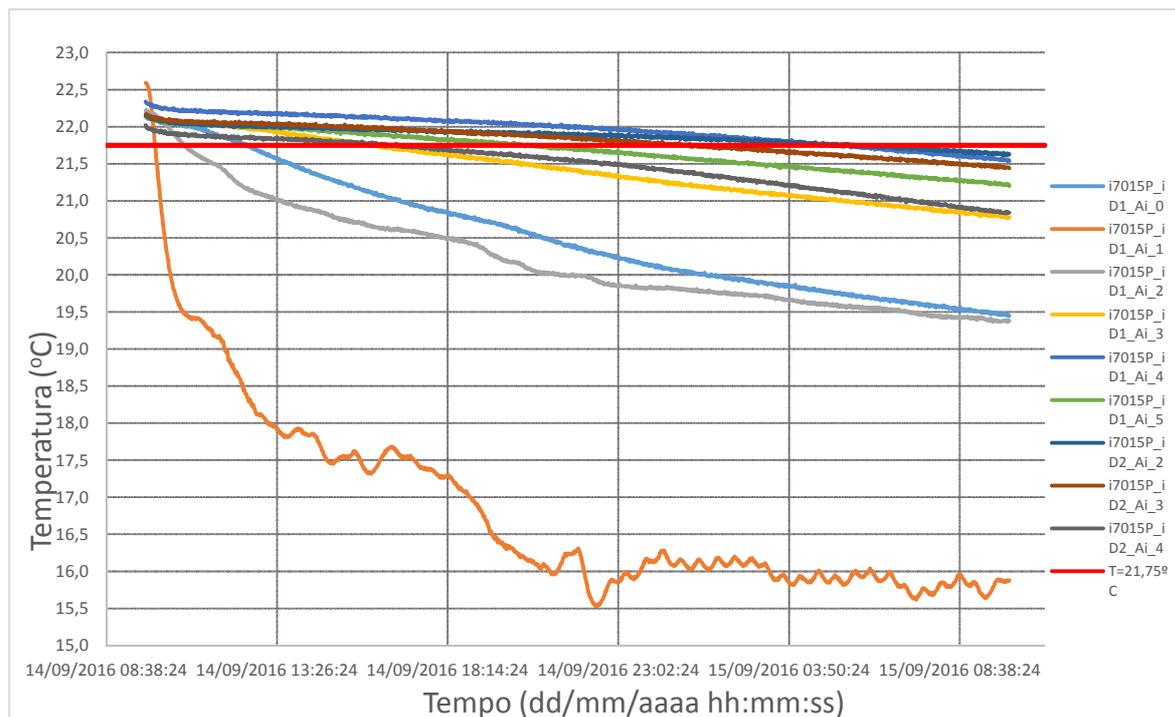


Figura 33. Delimitação da temperatura para a velocidade de propagação (refrigeração)

Tendo em conta a figura anterior torna-se possível obter todos os valores necessários para a execução da análise da velocidade de propagação da onda de calor.

É de realçar que esta análise teve por base as mesmas considerações utilizadas na fase de aquecimento do solo.

Assim sendo encontra-se na Tabela 15 o valor referente à velocidade de propagação durante a refrigeração do solo.

Tabela 15. Velocidade de propagação da onda de calor em casa sensor

Sensor	Tempo (min)	Tempo (s)	Distância <sup>1</sup> (m)	Velocidade (m/s)
i7015P_iD1_Ai_0	172	10320	0,2599	$2,5190 \cdot 10^{-5}$
i7015P_iD1_Ai_2	65	3900	0,0767	$1,9682 \cdot 10^{-5}$
i7015P_iD1_Ai_3	370	22200	0,3276	$1,4759 \cdot 10^{-5}$
i7015P_iD1_Ai_4	1186	71160	0,4940	$6,9423 \cdot 10^{-6}$
i7015P_iD1_Ai_5	619	37140	0,3061	$8,2433 \cdot 10^{-6}$
i7015P_iD2_Ai_2	1124	67440	0,6281	$9,3136 \cdot 10^{-6}$
i7015P_iD2_Ai_3	908	54480	0,4478	$8,2197 \cdot 10^{-6}$
i7015P_iD2_Ai_4	435	26100	0,4857	$1,8611 \cdot 10^{-5}$

1 – Esta distância representa uma média ponderada das distâncias das extremidades do provete e zona central ao sensor em causa

A velocidade de propagação da onda de calor referente à refrigeração diminui consoante a distância do ponto de medição à fonte térmica, ou seja, quanto maior a distância, menor será a velocidade de propagação da onda de calor.

### 3.2.6. Condutibilidade térmica

Apesar de pretender-se obter o parâmetro referente à condutibilidade térmica do solo, verificou-se que através dos valores obtidos da instrumentação, não é possível adquirir conclusões relativamente a este parâmetro.

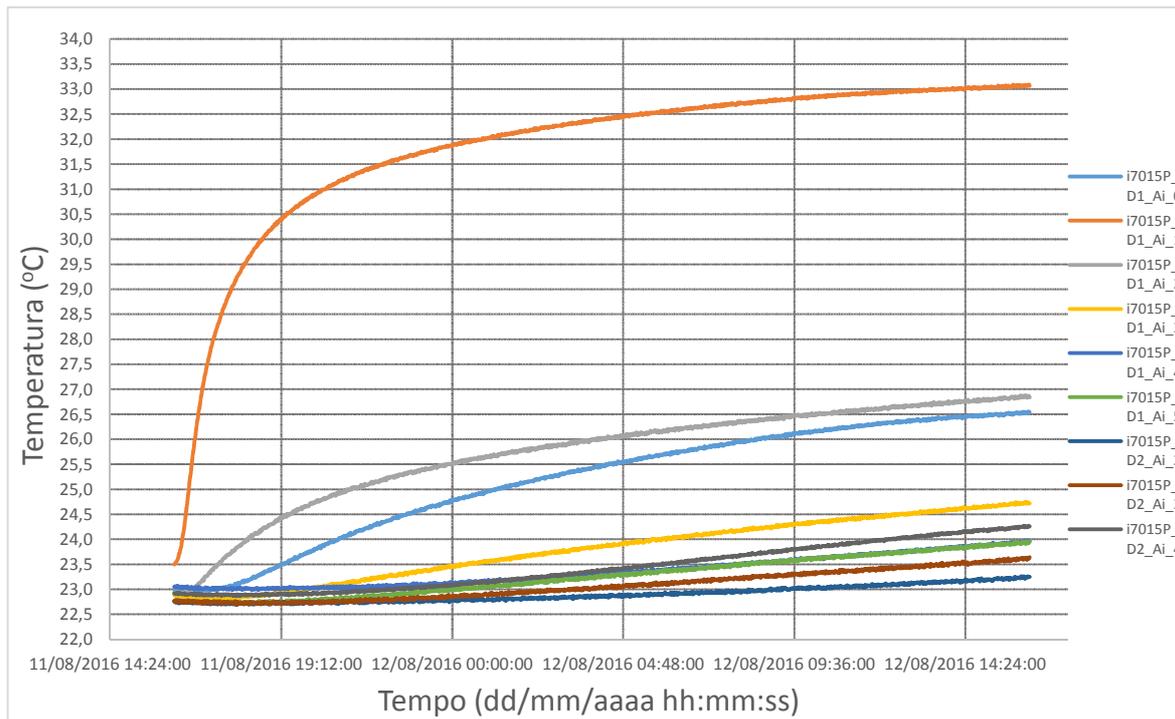
O motivo por não ser possível obter este parâmetro, deve-se a facto de a fonte de calor não possuir um comportamento de aquecimento/refrigeração instantâneo, ou seja, como a fonte de calor possui uma variação de temperatura gradual ao longo do tempo, faz com que haja interferências de calor impostas pela fonte térmica, impossibilitando deste modo a obtenção deste parâmetro.

Caso a fonte térmica possui-se uma variação de temperatura instantânea ou se esta fosse pré aquecida/arrefecida antes de ser colocada no solo para realizar-se a instrumentação, já seria possível concretizar a caracterização das propriedades térmicas do solo.

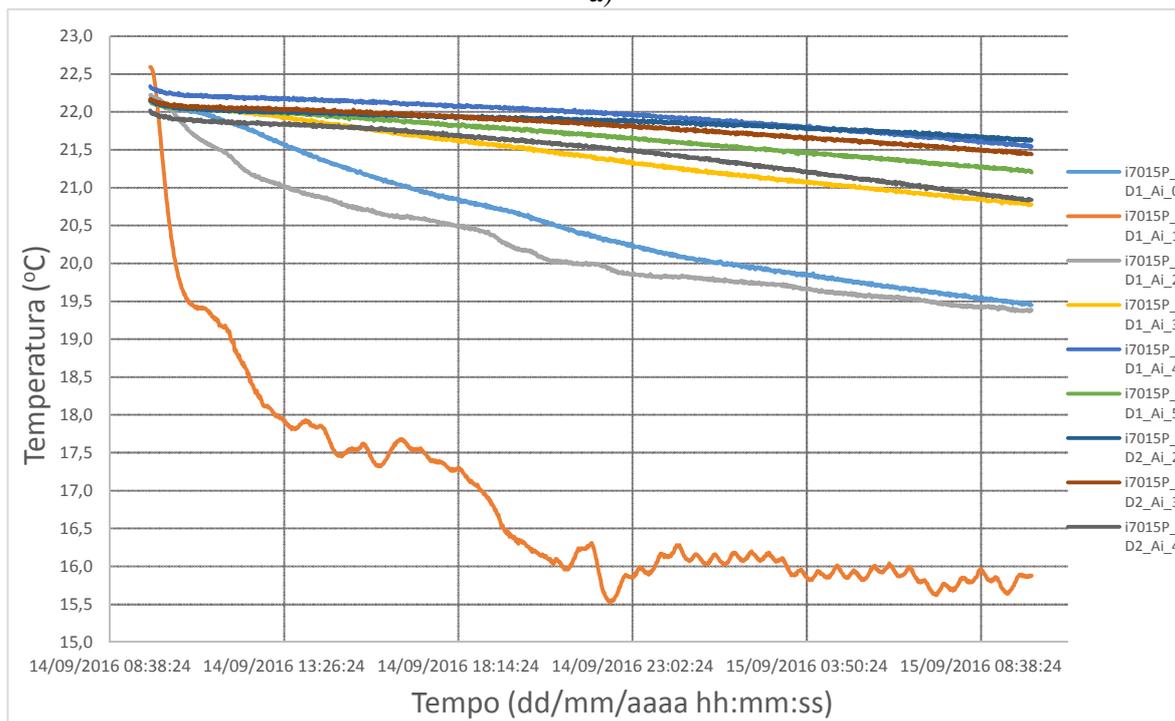
### 3.2.7. Comparação entre aquecimento e refrigeração do solo

Com as duas instrumentações concretizadas, torna-se possível compreender o comportamento do solo quando sujeito a duas solicitações de temperatura distintas entre si. Como a instrumentação relacionada com o aquecimento do solo possui um tempo de ensaio diferente da instrumentação de refrigeração do mesmo, tornou-se necessário restringir os dados do aquecimento a 24 horas (tempo da instrumentação de refrigeração) de modo a permitir a comparação entre instrumentações.

Assim sendo, e de modo simplificado, constata-se na Figura 34 o comportamento do solo nas primeiras 24 horas durante a fase de aquecimento, assim como na fase de refrigeração.



a)



b)

Figura 34. Instrumentação de 24 horas: a) aquecimento; b) refrigeração

Um fator importante a ter em conta nestes ensaios é que o ensaio de aquecimento do solo possui uma condutibilidade térmica diferente do ensaio de refrigeração do solo. Como se verifica na figura anterior, para este parâmetro ser igual nos dois ensaios, os valores obtidos

relativos às diferenças de temperatura teriam que ter a mesma ordem de valores, ou seja, caso a condutibilidade térmica fosse igual nos dois casos, a Figura 34 a) teria que ser o espelho da Figura 34 b).

De modo a comprovar que este parâmetro não é igual, encontra-se na Tabela 16 os valores referentes às variações de temperatura relativas às 24 horas de instrumentação para a fase de aquecimento e para a refrigeração.

Tabela 16. Variação da temperatura ao longo de 24 horas (°C)

	I7015P_ iD1_Ai_0	I7015P_ iD1_Ai_1	I7015P_ iD1_Ai_2	I7015P_ iD1_Ai_3	I7015P_ iD1_Ai_4	I7015P_ iD1_Ai_5	I7015P_ iD2_Ai_2	I7015P_ iD2_Ai_3	I7015P_ iD2_Ai_4
$\Delta T_{\text{aque}}^1$	3,55	9,57	3,90	1,82	0,91	1,20	0,48	0,88	1,34
$\Delta T_{\text{refri}}^2$	-2,69	-6,71	-2,84	-1,37	-0,80	-0,94	-0,52	-0,73	-1,34

1 – Diferença de temperatura na fase de aquecimento; 2 – Diferença de temperatura na fase de refrigeração

Assim sendo, e tendo em conta os dados da tabela, verifica-se que o solo quando aquecido possui uma maior condutibilidade térmica e conseqüentemente uma menor resistência térmica, fazendo com que seja mais fácil realizar a propagação de temperatura.

Relativamente à velocidade de propagação da onda de calor, constata-se que para existir uma diferença de temperatura de um grau, a instrumentação referente à refrigeração possui uma velocidade ligeiramente superior que a instrumentação de aquecimento. É de realçar que esta análise não é muito precisa, visto que as condições do ensaio não são as mais aconselhadas para fazer um estudo mais profundo relativamente a este parâmetro.



## 4. ANÁLISE COMPUTACIONAL

Sucintamente a análise computacional será composta por duas análises distintas sendo realizada uma análise relacionada com o aquecimento de solo, e outra relativa à refrigeração. Para que isso seja possível torna-se necessário estabelecer inúmeros parâmetros através de vários programas informáticos, possibilitando a modelação desejada em 2D (bidimensional). Relativamente aos programas informático e como já fora referido, serão utilizadas as seguintes ferramentas informáticas:

- AutoCAD;
- Pointwise;
- ANSYS Fuent;

### 4.1. AutoCAD

A geometria do modelo foi realizada em AutoCAD, tendo em consideração todas as medidas referentes ao modelo laboratorial, sendo estas:

- Dimensões do reservatório;
- Dimensões da fonte de calor (provetete de betão).

É de realçar que esta geometria serve de igual modo para as duas modelações a realizar.

Na Figura 35, verifica-se o modelo geométrico realizado em AutoCAD, assim como todas as dimensões geométricas adotadas. Apesar de não ser necessário, encontra-se evidenciado os materiais adotados durante a modelação, tendo em conta o que foi considerado na instrumentação realizada em laboratório.

Denota-se que a geometria adotada para a modelação numérica representa apenas metade do reservatório e respetivos materiais utilizados na componente prática. Isto deve-se a parâmetros considerados relativamente ao programa ANSYS Fluent.

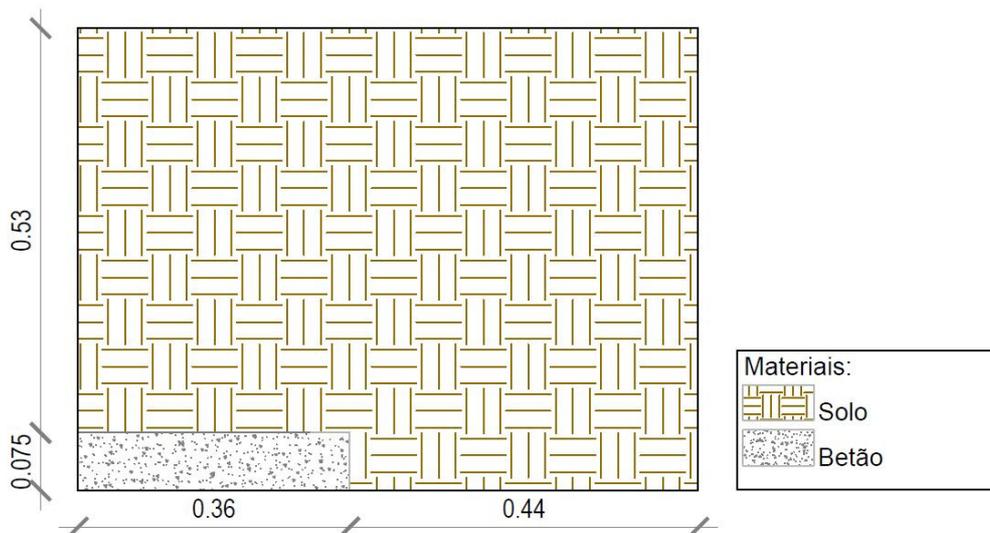


Figura 35. Geometria do modelo obtido através do AutoCAD

## 4.2. Pointwise

Com a geometria estabelecida através do AutoCAD, torna-se necessário a criação de domínios (malhas) essenciais para o cálculo. Quanto mais fechados são os domínios, mais precisos são os valores obtidos através da modelação numérica. Com o intuito de facilitar a criação das malhas, utilizou-se a ferramenta informática Pointwise.

Além das malhas, a ferramenta Pointwise permite também a atribuição das condições de fronteira essenciais para o cálculo numérico. No caso de estudo foram atribuídas a designação de Wall às laterais do modelo, possibilitando deste modo a atribuição de propriedades térmicas necessárias para a modelação. Estas propriedades podem ser de diferentes tipos, ou seja, podem ser temperaturas, fluxos de calor, convecções e radiações. Relativamente à face inferior do modelo atribui-se a designação de AXIS, que tem a função de eixo de rotação do modelo.

No que se refere às condições fronteira da fonte de calor, o Pointwise não atribui qualquer designação, apesar de que o ANSYS Fluent em uma fase posterior atribui automaticamente a designação necessária para o cálculo.

Relativamente às malhas (domínios), foi apenas atribuído um dos dois tipos disponíveis pela ferramenta, ou seja, para o solo e para a fonte de calor (elemento de betão) foi apenas considerado o tipo de malha estrutural em vez da não estrutural. O facto de ter-se considerado apenas este tipo, deve-se ao aspeto apresentado pela mesa (formato retangular) e ao rigor de cálculo que esta apresenta, apesar de ser mais complexa a sua execução.

Resumidamente encontra-se na Figura 36 o tipo de domínio utilizado assim como a atribuição das condições de fronteira.

É de realçar que para a execução do domínio foi necessária a utilização de linhas auxiliares que permitem a criação dos mesmos de forma mais simplificada. Apesar de estas linhas se encontrarem no interior do modelo, elas não interferem em nada no processo de modelação.

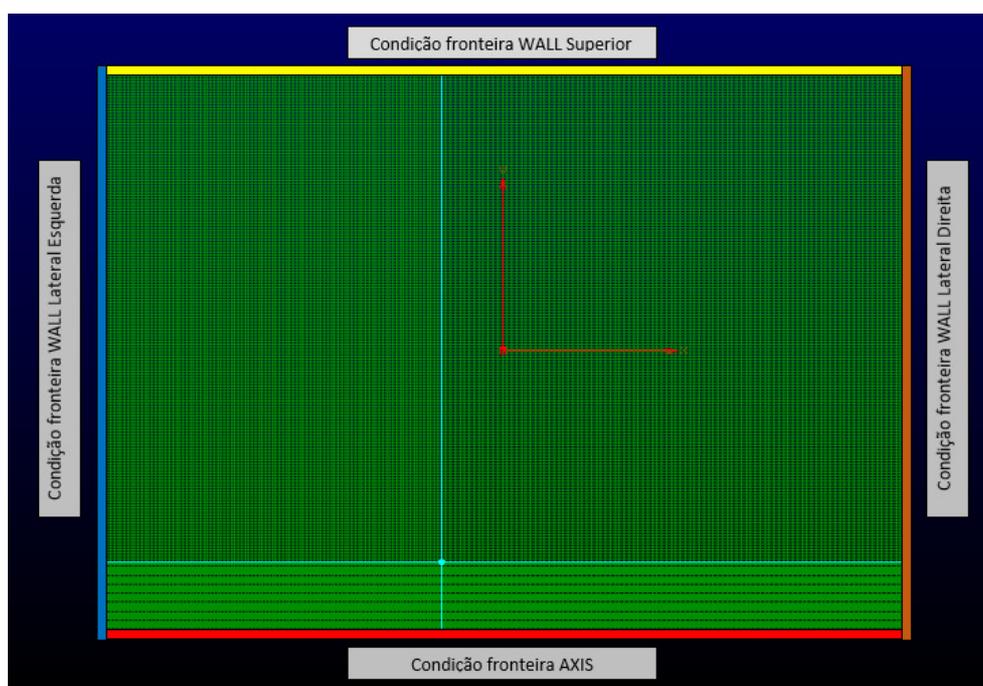


Figura 36. Aspeto da malha e designação das condições de fronteira

### 4.3.ANSYS Fluent

Com o desenho das malhas realizado exporta-se o ficheiro do Pointwise para o ANSYS Fluent ao qual se procederá à realização final da modelação.

Para realizar-se a modelação pretendida, é necessário ter em consideração vários fatores importantes, para que nada ocorra de errado com a análise numérica.

#### 4.3.1. Verificação das malhas

A verificação das malhas corresponde ao primeiro passo referente à utilização do ANSYS Fluent. O programa possui a funcionalidade de verificar a consistência da malha assim como o tamanho da mesma, caso esta não corresponda aos níveis de qualidade estabelecidos pelo

programa, existe a possibilidade de aprimorar a malha com uma funcionalidade do programa.

Em certas alturas o programa não consegue corrigir possíveis erros referentes às malhas, o que obriga a voltar à ferramenta Pointwise para gerar uma nova malha, com o objetivo de colmatar os erros existentes. Só quando o ANSYS Fluent confirmar que a malha já possui a qualidade necessária, é que torna-se possível proceder à atribuição dos parâmetros necessário à modelação numérica.

#### 4.3.2. Tipo de análise numérica

A escolha do tipo de análise representa um ponto fulcral no que se refere aos cálculos realizados pelo programa. Nesta dissertação foi optada a realização da modelação numérica “*axisymmetric*”.

Este tipo de análise permite através de um modelo bidimensional adquirir os mesmos resultados que eram obtidos através de uma análise tridimensional.

O método de análise “*axisymmetric*” utiliza um eixo de rotação (base do modelo- condição de fronteira Axis) para poder proceder a todos os cálculos necessários. A atribuição deste eixo pode ser efetuada no Pointwise assim como no ANSYS Fluent.

Na Figura 37 verifica-se o procedimento de modelação segundo a vertente “*axisymmetric*”.

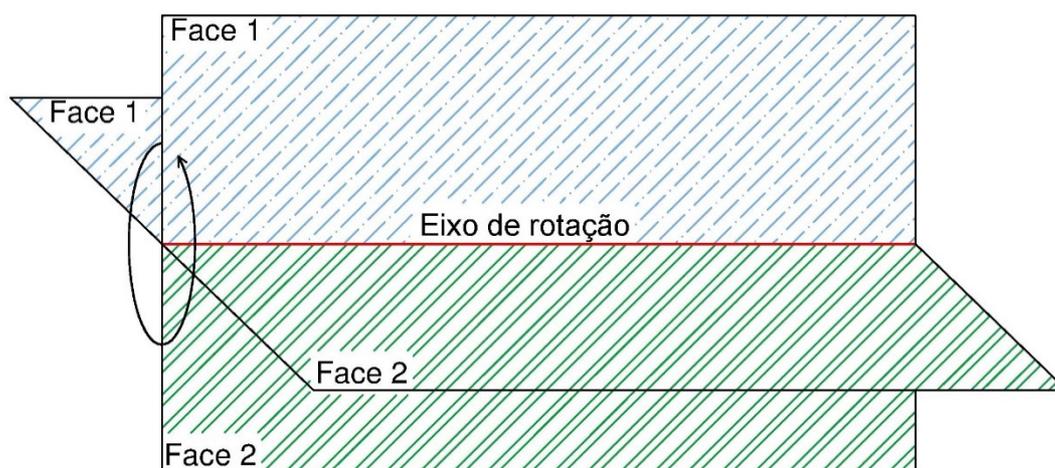


Figura 37. Esquema de modelação “*axisymmetric*”

Além da análise “*axisymmetric*” é necessário considerar para a modelação o fator “*transient*” que permite executar uma análise de resultados segundo o fator tempo, ou seja, permite realizar o estudo da temperatura segundo tempo.

#### 4.3.3. Equação de energia

Com base no tipo de análise escolhido, torna-se essencial, para a modelação, ativar a equação energia. Esta equação permite que ocorram trocas de temperatura entre materiais. Sem esta opção ativada, não é possível atribuir temperaturas fundamentais para a análise numérica.

#### 4.3.4. Definição dos materiais

No que se refere aos materiais a atribuir na modelação, o ANSYS Fluent possui um rol variadíssimo de escolhas relativamente a esta componente, tendo em conta o tipo de estado físico do material necessário, ou seja, o programa permite efetuar uma escolha de materiais no carácter sólido e líquido.

Na modelação desejada apenas foram considerados materiais sólidos para os domínios. Apesar de o programa possuir uma grande base de dados relativamente a materiais, verificou-se que para a modelação desejada o ANSYS Fluent não possuía as propriedades físicas e térmicas de solos nem da fonte de calor (betão).

Assim sendo a atribuição de todas as propriedades necessárias para o modelo numérico foram introduzidas manualmente no programa. Todos os parâmetros adotados encontram-se evidenciados na Tabela 17.

É de realçar que todos os dados obtidos relativamente às propriedades físicas do solo, proveem da análise laboratorial do mesmo. Devido à impossibilidade da determinação das propriedades térmicas do solo, teve-se em conta casos genéricos de modo a obter os valores pretendidos de modo a realizar a modelação.

Tabela 17. Características referentes ao solo seco

Material	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Condutibilidade térmica (W/m·k)	Calor específico (j/kg·k)
Solo	1672	0,3	600
Betão	2500	2,0	750

Com os materiais criados no programa de cálculo (solo e betão), torna-se possível atribuir às malhas os respetivos materiais de modo a proceder à modelação.

#### 4.3.5. Verificação das condições de fronteira

Tal como para as malhas, o ANSYS Fluent permite efetuar uma verificação relativamente às condições de fronteira estabelecidas no Pointwise. É de realçar que esta verificação é manual e deve ser realizada para todas as condições de fronteira.

Caso na exportação as condições de fronteira não fiquem bem atribuídas, torna-se necessário efetuar a atribuição das mesmas no ANSYS Fluent.

É de notar que o programa Pointwise não possibilita a atribuição da condição fronteira da resistência, visto que o ANSYS Fluent realiza a designação desta condição de forma autónoma.

Assim sendo, na transição de material entre o solo e a resistência, o programa de modelação atribui a condição de fronteira designada de Wall-Shadow, que permite uma maior facilidade em atribuir dados na envolvente resistência-solo, e consequentemente efetuar uma melhor análise relativamente a trocas de calor.

#### 4.3.6. Calibração do modelo numérico

Com todas as condições de fronteira verificadas, torna-se possível proceder à calibração do modelo numérico, no âmbito das temperaturas.

Todas as temperaturas inseridas no modelo foram medidas durante a componente laboratorial, permitindo deste modo obter uma simulação numérica mais similar à realidade. As condições de fronteira são os elementos responsáveis pela atribuição da temperatura registada na componente prática.

Deste modo torna-se possível proceder à calibração do modelo numérico para as duas situações em estudo.

É de realçar que a condição de fronteira AXIS não permite a atribuição de temperaturas, ou seja, esta condição de fronteira serve como eixo de rotação, tendo assim propriedades diferentes das restantes presentes no modelo.

Na Tabela 18 e 19 verificam-se as temperaturas de cada condição fronteira e da fonte de calor para as duas situações em estudo.

Tabela 18. Temperatura para a modelação relativa ao aquecimento do solo

Condições de fronteira	Lateral esq.	Lateral dir.	Superior	Betão
Temperatura (°C)	22,96	22,76	22,91	35,18

Tabela 19. Temperatura para a modelação relativa à refrigeração do solo

Condições de fronteira	Lateral esq.	Lateral dir.	Superior	Betão
Temperatura (°C)	22,08	22,15	22,17	15,88

Denote-se que as temperaturas adotadas representam as médias das temperaturas registadas pelos sensores mais próximos da face do modelo em causa.

#### 4.3.7. Número de interações

Após todas as verificações necessárias, criação e atribuição de materiais e calibração do modelo, torna-se então possível proceder à escolha do número de interações que o programa considera para o cálculo.

Como pretende-se obter uma simulação do que aconteceu em laboratório, teve-se em consideração que a modelação terminava apenas quando, atingisse o mesmo intervalo de tempo que a componente laboratorial.

Assim sendo para obter-se a modelação desejada definiu-se no programa o tempo de cálculo entre cada interação (“*Time Step Size*”- TSS) assim como a quantidade de interações (“*Number of Time Steps*” - NTS). Conjugando estes dois fatores é possível obter o tempo de modelação pretendido.

De modo a conseguir-se realizar uma futura comparação entre a componente numérica e laboratorial considerou-se para as duas modelações (aquecimento do solo e refrigeração do solo) um TSS de 60 segundos. A atribuição deste valor significa que a cada interação obtenho o resultado de correspondente a 60 segundos na realidade.

Relativamente ao NTS teve-se de considerar valores diferentes para as duas situações, visto que o tempo de instrumentação difere entre eles. Como cada interação corresponde a 60 segundos reais, apenas tem-se de colocar no programa o número de interações correspondentes ao tempo de instrumentação. Na Tabela 20 encontram-se descritos os NTS para cada modelação.

Tabela 20. Dados responsáveis pelas interações

Modelação	TSS (s)	NTS	Tempo final da modelação
Aquecimento	60	10080	7 dias
Refrigeração	60	1440	24 horas

Definido o número de interações procede-se ao cálculo do modelo numérico. Na Figura 38 verifica-se o aspeto final do modelo numérico no ANSYS Fluent antes de ser calculado.

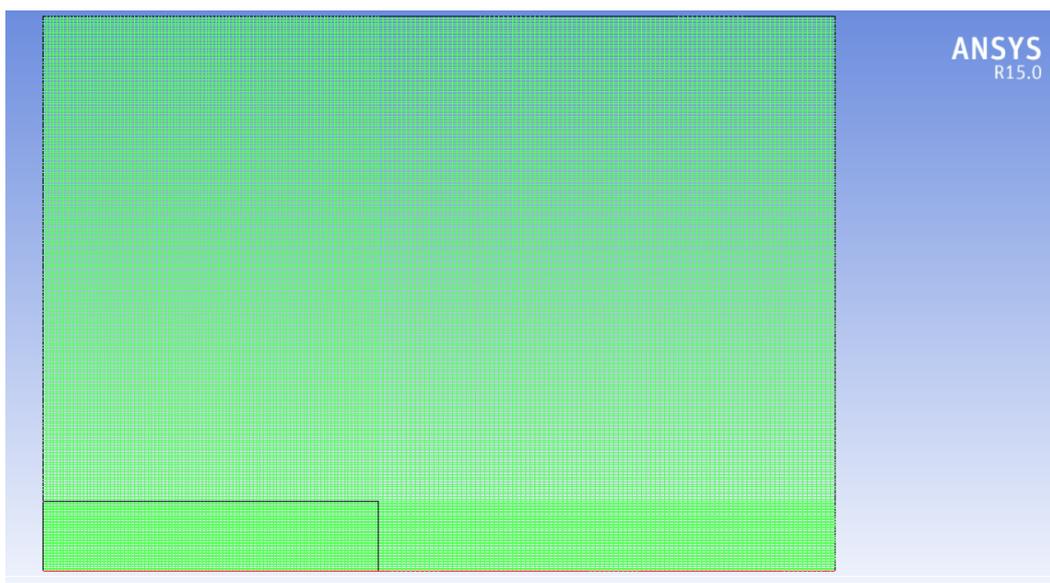


Figura 38. Modelo numérico final no ANSYS Fluent

## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Com as modelações realizadas procede-se à análise de resultados e a uma eventual comparação dos dados obtidos através do modelo numérico e a instrumentação.

Para realizar-se a comparação entre a modelação e a instrumentação, teve-se a necessidade de criar nos modelos numéricos pontos de monitorização, posicionados nas mesmas localizações que a componente laboratorial, permitindo deste modo realizar uma comparação direta entre resultados. Na Figura 39 constata-se os pontos de monitorização considerados (círculos azuis), ao qual foram atribuídas as mesmas designações de modo a facilitar comparações entre a modelação e a instrumentação.

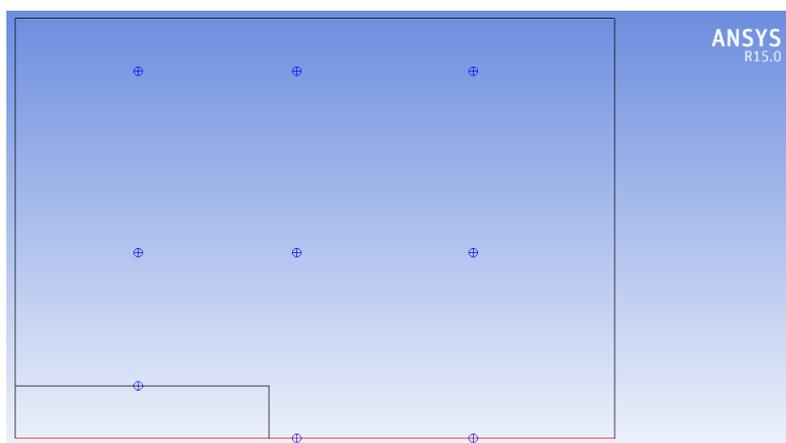


Figura 39. Localização dos pontos de monitorização

Devido à colocação dos pontos de monitorização, o programa só executava cálculos tendo as temperaturas em Kelvin, fazendo com que fosse necessário no final da modelação converter os dados para graus Celcius.

Denote-se que devido às equações que o programa usa para fazer os cálculos, apenas pode-se realizar uma análise qualitativa dos dados, ou seja, como o ANSYS Fluent usa equações de fluxos, apenas tem-se uma aproximação do que acontece na realidade. Caso o programa usá-se equações de energia poder-se-ia realizar uma análise quantitativa, visto que estaria a simular o que ocorreu na instrumentação.

Assim sendo, e com a modelação concretizada, procede-se à análise de resultados tendo por base os valores obtidos na instrumentação.

### 5.1. Modelação do aquecimento do solo

Com todos os valores obtidos através da modelação, torna-se possível efetuar o estudo relativo ao comportamento aproximado que o solo possui a variações de temperatura. Na Figura 40 encontra-se representado o bolbo de temperaturas que o ANSYS Fluent fornece, possibilitando a compreensão das diferentes temperaturas ao longo de todo o solo.

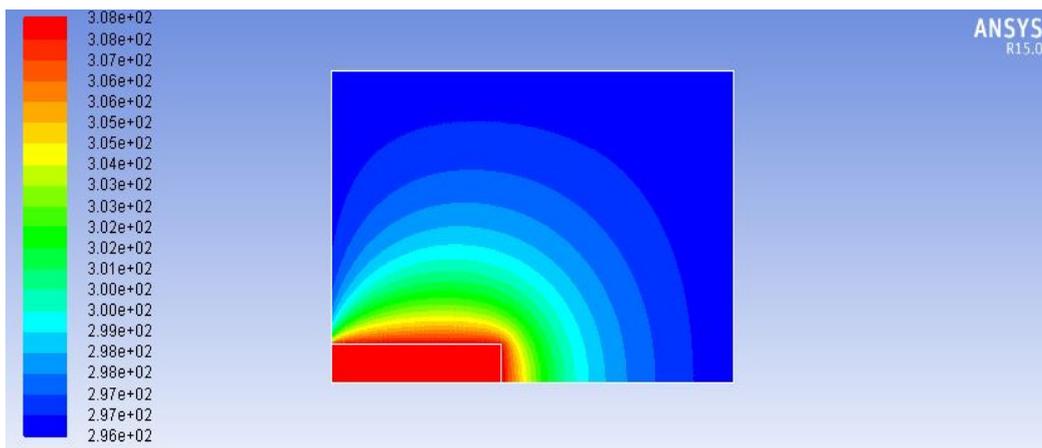


Figura 40. Bolbo de temperatura na fase de aquecimento do solo

Denote-se que a figura anterior representa o resultado final da modelação, ou seja, demonstra uma aproximação do bolbo de temperatura que se teria ao sétimo dia de instrumentação. De modo a compreender-se melhor que temperaturas finais estariam a ser registadas pelos pontos de monitorização, encontra-se evidenciado na Figura 41 respetivos pontos com a respetiva designação proveniente do bolbo de temperatura.

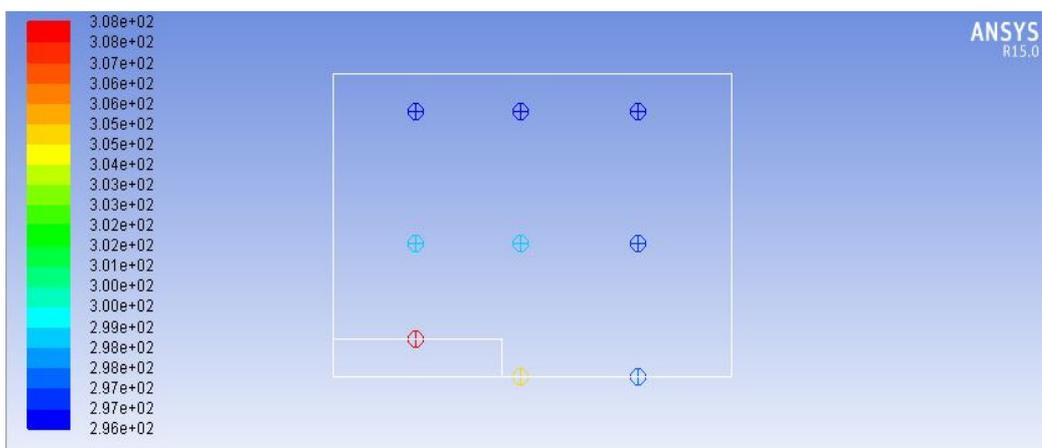
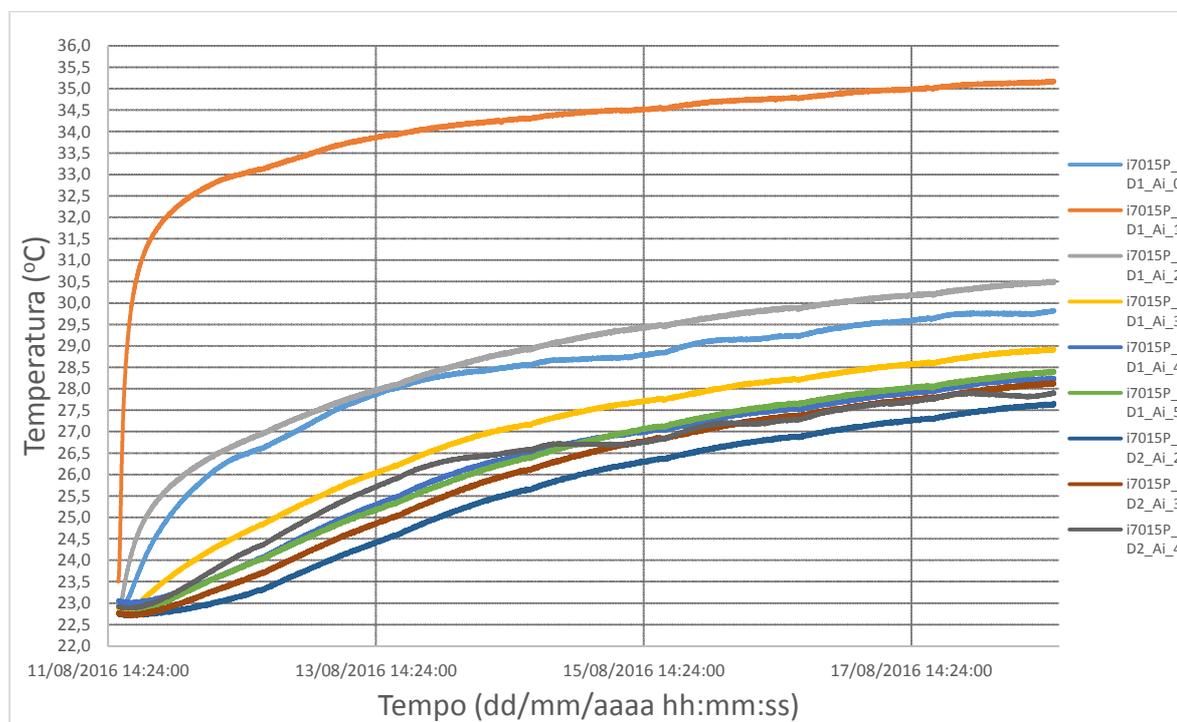
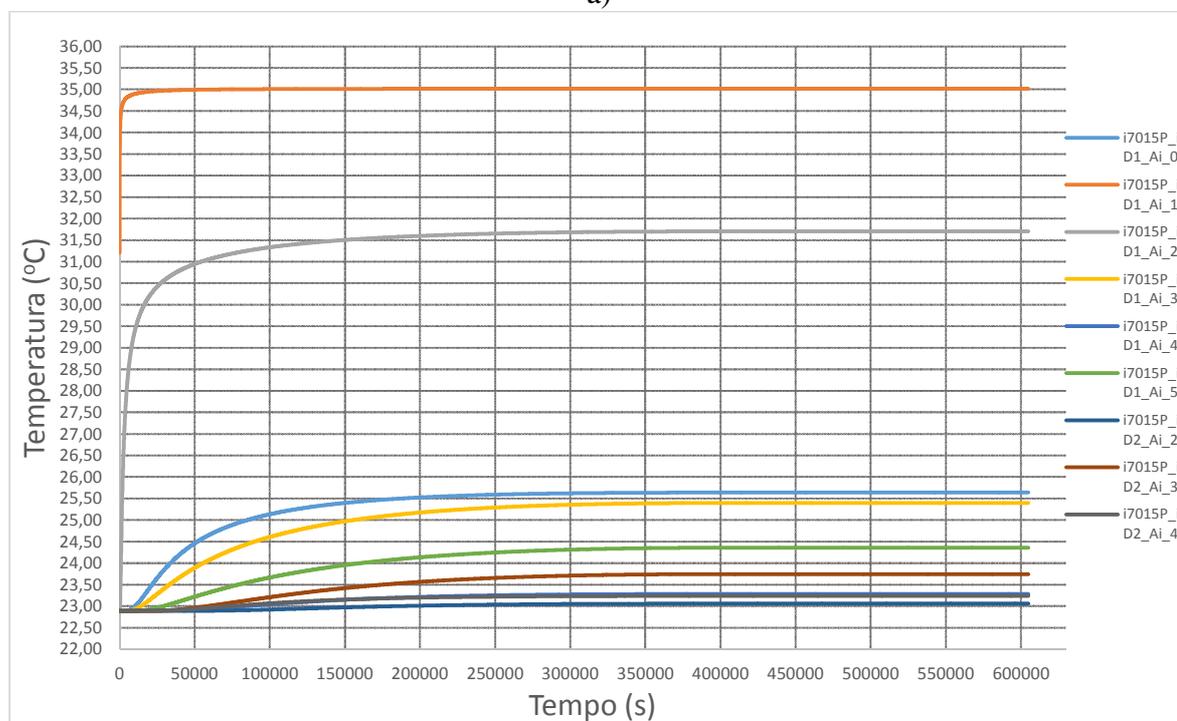


Figura 41. Pontos de monitorização com respetiva temperatura (aquecimento)

Com o objetivo de realizar-se uma comparação entre a modelação e a componente instrumental, encontra-se representado na Figura 42 todos os dados obtidos através do programa, assim como os resultados provenientes da instrumentação.



a)



b)

Figura 42. Aquecimento do solo: a) instrumentação; b) modelação

Note-se que apesar de dois eixos horizontais da figura anterior apresentarem escala de valores diferentes, ambos representam 7 dias.

Como se pode verificar na figura anterior, o fornecimento de calor no solo não é realizado da mesma forma, ou seja, durante a instrumentação a fonte de calor aumentou de temperatura de forma gradual até chegar aos 35,18°C. Por sua vez no programa teve-se que indicar logo de início a sua temperatura final, visto que não era possível recriar o comportamento ocorrido no elemento de betão.

É de realçar que apesar de indicar-se a temperatura de 35,18°C, o programa apresenta uma pequena oscilação no início da modelação, devido ao facto de se tratar de componentes de cálculo do próprio programa.

As condições recriadas no programa (temperatura inicial do betão igual à final) seriam ideais para a instrumentação caso pudessem ser aplicadas, visto que deste modo seria possível obter dados para a obtenção da caracterização do solo relativamente à condutibilidade térmica.

Como o programa utilizado utiliza equações de fluxos em vez de energia, contata-se na figura anterior que os dados obtidos através do modelo numérico são diferentes da instrumentação. Apesar de se verificar que apenas uma curva possui propriedades idênticas entre a modelação e a instrumentação (curva relativa ao sensor “i7015\_iD1\_Ai\_2” – cor cinzenta), contata-se que as restantes não possuem qualquer aproximação com a realidade. Na Tabela 21 verifica-se a diferença entre as duas componentes relativamente à variação de temperatura registada e as temperaturas máximas em cada sensor/ponto de monitorização ao fim de 7 dias.

Tabela 21. Dados relativos à modelação e à instrumentação (°C)

	I7015P_ iD1_Ai_0	I7015P_ iD1_Ai_1	I7015P_ iD1_Ai_2	I7015P_ iD1_Ai_3	I7015P_ iD1_Ai_4	I7015P_ iD1_Ai_5	I7015P_ iD2_Ai_2	I7015P_ iD2_Ai_3	I7015P_ iD2_Ai_4
T <sub>max instr.</sub>	29,85	35,18	30,53	28,94	28,34	28,44	27,79	28,20	28,04
T <sub>max mod.</sub>	25,64	35,02	31,70	25,40	23,28	24,36	23,06	23,75	23,24
ΔT <sub>instr.</sub>	6,83	11,68	7,58	6,01	5,17	5,62	4,39	5,36	4,99
ΔT <sub>mod</sub>	2,75	3,81	8,81	2,51	0,39	1,47	0,17	0,86	0,35

Caso houvesse aproximação de resultados entre a modelação e a instrumentação, poder-se-ia obter algumas conclusões relativamente à condutibilidade térmica utilizada no modelo numérico. Assim sendo, devido à diferença de resultados não é possível concluir se foi utilizado valores correspondentes às propriedades térmicas maiores ou menores que a realidade.

Outro fator a considerar relativamente à modelação é que ao fim dos 7 dias, a temperatura do solo estabilizou não havendo quaisquer indícios de homogeneização de temperatura, algo que não se verifica na instrumentação.

Ao analisar os dados da modelação verificou-se que existam semelhanças entre resultados, mas em situações distintas, ou seja, os dados obtidos ao fim dos 7 dias de modelação semelhavam-se às primeiras 24 horas de instrumentação. Na Tabela 22 verifica-se as eventuais temperaturas máximas das primeiras 24 de instrumentação e os 7 dias de modelação, assim como as respetivas diferenças de temperatura.

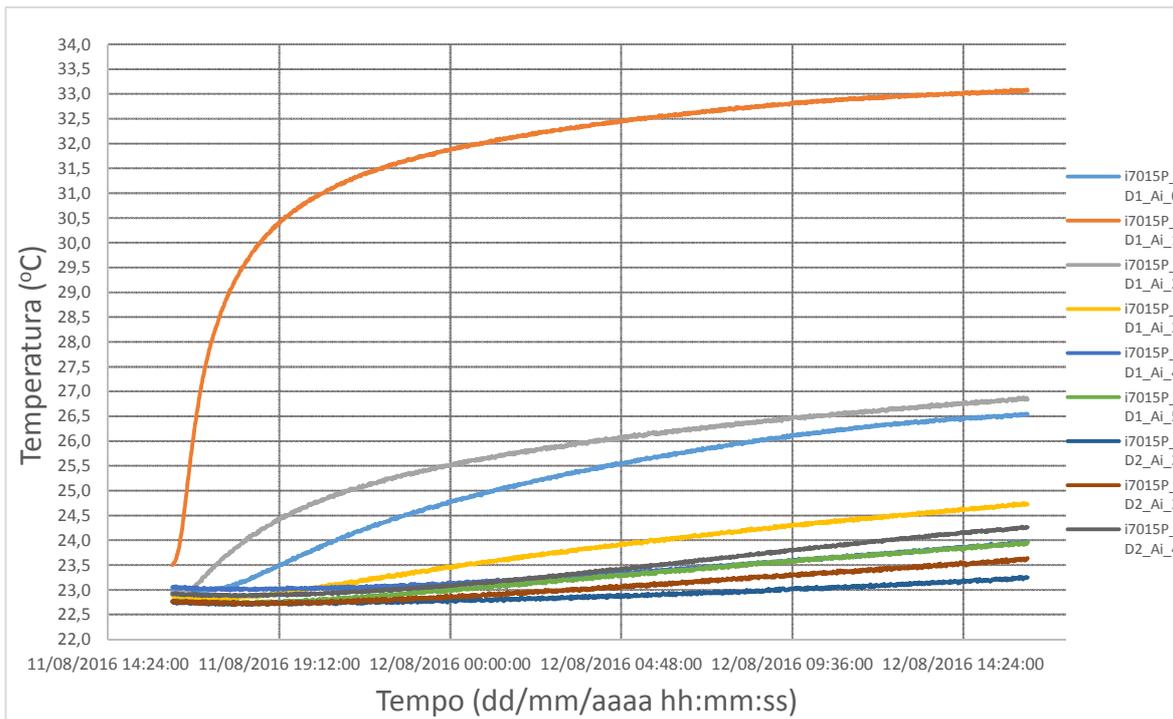
Tabela 22. Dados relativos à modelação e a 24 horas de instrumentação (°C)

	17015P_ iD1_Ai_0	17015P_ iD1_Ai_1	17015P_ iD1_Ai_2	17015P_ iD1_Ai_3	17015P_ iD1_Ai_4	17015P_ iD1_Ai_5	17015P_ iD2_Ai_2	17015P_ iD2_Ai_3	17015P_ iD2_Ai_4
$T_{\max \text{ instr.}}$	26,54	33,07	26,84	24,72	23,96	23,96	23,25	23,64	24,26
$T_{\max \text{ mod.}}$	25,64	35,02	31,70	25,40	23,28	24,36	23,06	23,75	23,24
$\Delta T_{\text{ instr.}}$	3,55	9,57	3,90	1,82	0,91	1,20	0,48	0,88	1,34
$\Delta T_{\text{ mod}}$	2,75	3,81	8,81	2,51	0,39	1,47	0,17	0,86	0,35

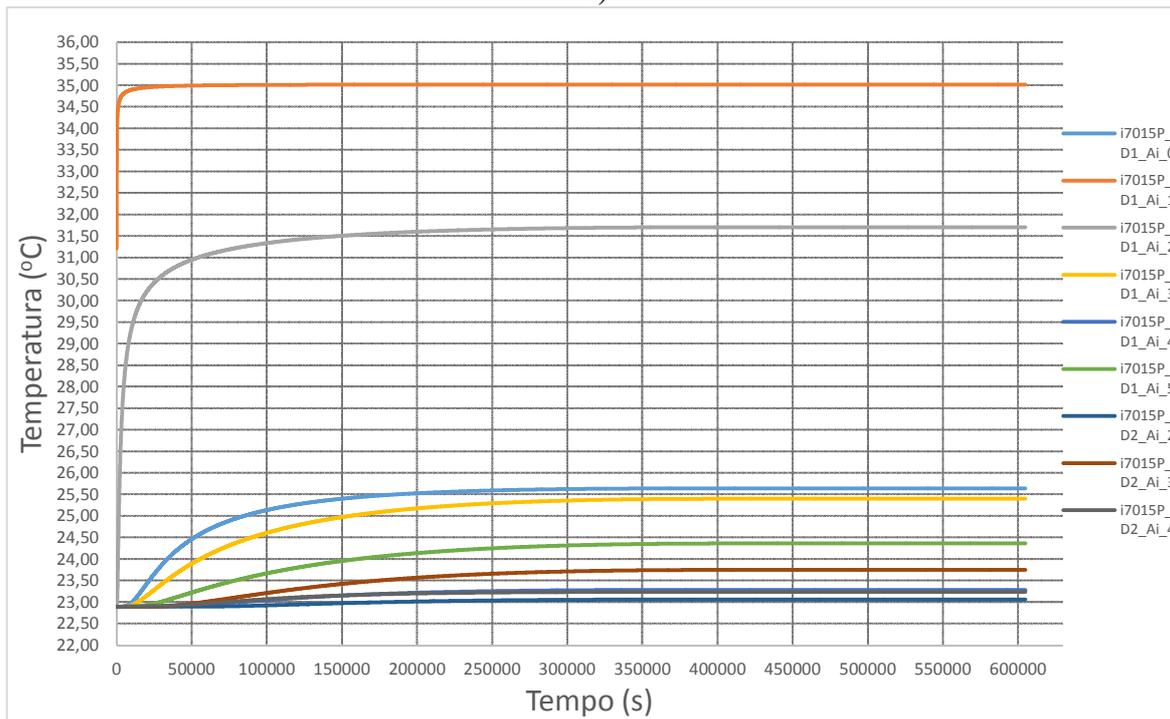
Apesar de haver uma semelhança entre valores, não é possível obter conclusões relativas à condutibilidade térmica, devido à questão do tempo associado a cada componente (7 dias de modelação e 24 horas de instrumentação). Caso houvesse uma situação ideal em que o tempo de modelação fosse igual à instrumentação e as temperaturas fossem semelhantes, já seria possível obter conclusões acerca dos parâmetros térmicos associados para no modelo numérico.

Na Figura 43 constata-se a questão relativamente a diferentes situações temporais entre a modelação e a instrumentação em que existem uma eventual semelhança de valores.

É de realçar que entre todas as curvas representadas existem apenas três que se assemelham entre a modelação e a instrumentação. As curvas em causa correspondem ao comportamento da fonte de calor (provetes de betão-curva a cor laranja) e aos pontos de monitorização/sensores (curva relativa ao ponto de monitorização/sensor “i7015\_iD1\_Ai\_2” – cor cinzenta e “i7015\_iD1\_Ai\_0” – cor azul claro).



a)



b)

Figura 43. Aquecimento do solo: a) 24 horas de instrumentação; b) modelação

## 5.2. Modelação da refrigeração do solo

Assim como foi realizado para a modelação de aquecimento do solo, foi analisado no ANSYS Fluent as variações de temperatura associadas ao arrefecimento do mesmo, estando representado na Figura 44 o bolbo de temperatura resultante da modelação para 24 horas de duração de modo a simular a instrumentação.

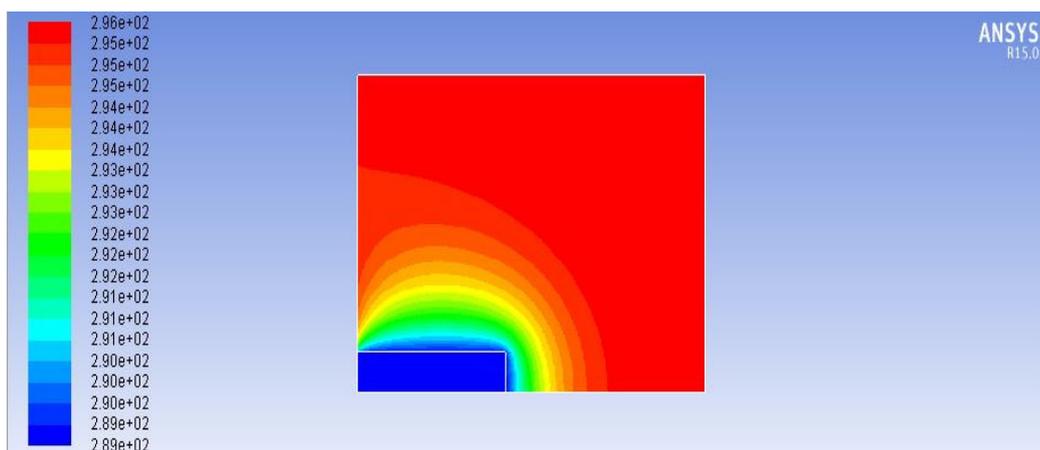


Figura 44. Bolbo de temperatura na fase de arrefecimento do solo

De modo a compreender-se melhor que temperaturas finais estariam a ser registadas pelos pontos de monitorização, encontra-se evidenciado na Figura 45 as respetivas temperaturas.

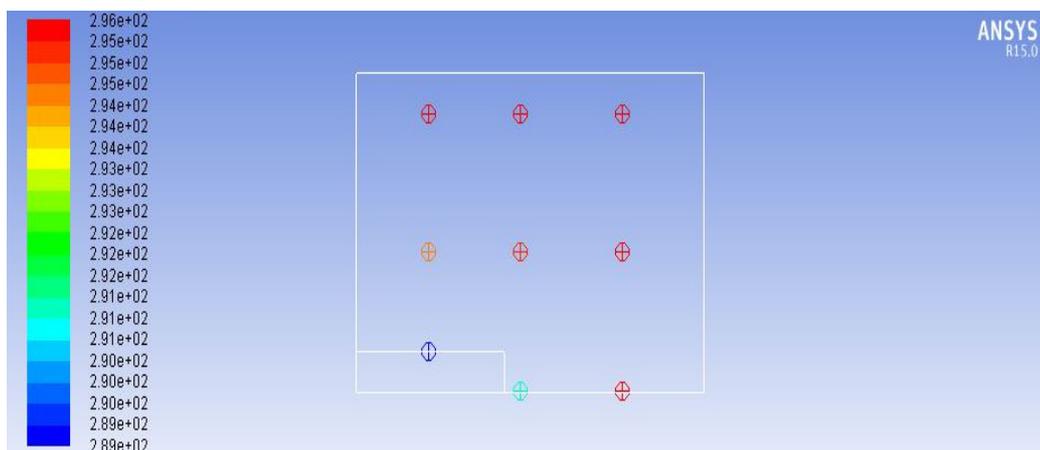
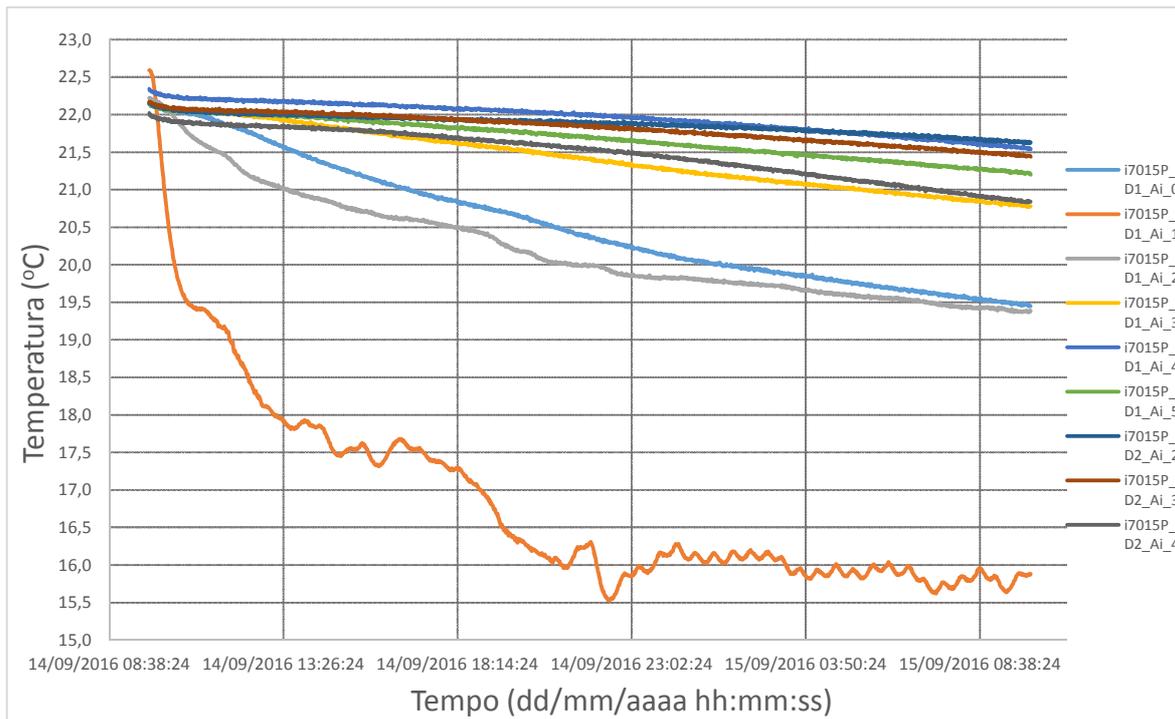
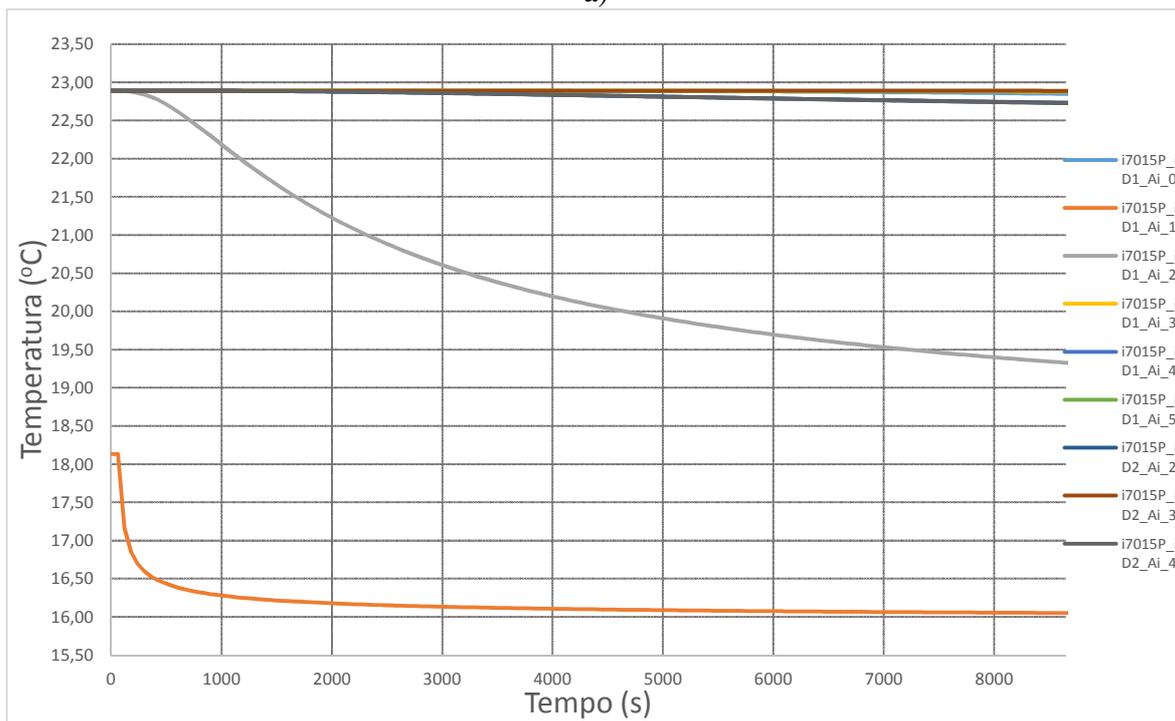


Figura 45. Pontos de monitorização com respetiva temperatura (refrigeração)

De modo a realizar uma comparação entre a modelação e a componente instrumental, encontra-se representado na Figura 46 todos os dados obtidos através do programa, assim como os resultados provenientes da instrumentação.



a)



b)

Figura 46. Refrigeração do solo: a) instrumentação; b) modelação

Assim como fora já referido, apesar de verificar-se na figura anterior os eixos horizontais com escala de valores diferentes, ambos representam 1 dia (24 horas).

Tal como foi verificado para a modelação relativa ao aquecimento do solo, o fornecimento de calor não é realizado do mesmo modo que a instrumentação, em que o provete de betão possuía uma temperatura inicial de 22,59 e ao fim de 24 horas ficou com uma temperatura de 15,88. Por sua vez foi atribuído no modelo numérico a temperatura final registada na instrumentação com o objetivo de obter uma simulação mais aproximada da realidade.

É de realçar que a modelação relativa à refrigeração do solo possui no início uma pequena oscilação de temperatura relativa ao elemento de betão, isto deve ao facto de se tratar de componentes de cálculo do programa.

No que se refere à comparação das propriedades térmicas do solo entre a modelação e a instrumentação, com o objetivo de compreender-se se foram usados as características mais adequadas, constata-se que esta tarefa torna-se impossível de ser verificada.

Apesar de se constatar que apenas uma das curvas da modelação possui propriedades semelhantes à instrumentação (curva relativa ao sensor “i7015\_iD1\_Ai\_2” – cor cinzenta), constata-se que mais nenhuma curva relativa aos pontos de monitorização possuem características idênticas aos dados obtidos através da instrumentação.

Na Tabela 23 é possível verificar as diferenças de temperatura e as temperaturas mínimas registadas ao fim das 24 horas de instrumentação e de modelação de modo a reforçar a comparação de resultados.

Tabela 23. Dados relativos à modelação/instrumentação da refrigeração do solo (°C)

	I7015P_ iD1_Ai 0	I7015P_ iD1_Ai 1	I7015P_ iD1_Ai 2	I7015P_ iD1_Ai 3	I7015P_ iD1_Ai 4	I7015P_ iD1_Ai 5	I7015P_ iD2_Ai 2	I7015P_ iD2_Ai 3	I7015P_ iD2_Ai 4
$T_{\min}$ instr.	19,45	15,88	19,38	20,78	21,54	21,20	21,63	21,44	20,84
$T_{\min}$ mod.	21,32	15,97	18,08	21,80	22,27	22,23	22,28	22,39	22,19
$\Delta T$ instr.	-2,69	-6,71	-2,84	-1,37	-0,80	-0,94	-0,52	-0,73	-1,34
$\Delta T$ mod	-1,57	-2,16	-4,81	-1,09	-0,62	-0,66	-0,61	-0,50	-0,70

Assim como se verificou para a modelação relacionada com o aquecimento do solo, caso houvesse semelhança entre valores da modelação e instrumentação já seria possível obter conclusões relativas às propriedades térmicas.

Ao contrário do que aconteceu com a modelação relativa ao aquecimento, o solo neste caso de estudo não estabilizou a sua temperatura, fazendo com que ainda existam diferenças de temperatura ao fim de 24 horas apesar de serem muito pequenas. Para que exista uma possível estabilização de valores seria necessário realizar a modelação num maior intervalo de tempo, sendo 24 horas um intervalo pequeno.

### 5.3.Considerações Gerais

Após a análise de resultados, constata-se que o programa utilizado não se trata do mais indicado para o caso de estudo. Isto deve-se ao facto de o programa utilizar equações de fluxo em vez de equações de energia, tal como já fora referido.

Além disso constata-se que segundo o programa é mais simples aquecer o solo do que arrefecer, visto que ao tratar-se de um fluxo, é mais fácil espalhar o fluxo em um corpo do que estar a concentra-lo em um único ponto, confinando-o (no caso de estudo) na zona do elemento de betão.

Quando procede-se ao processo de refrigeração do solo através do ANSYS Fluent, o programa procede à extração de fluxos, como no caso de estudo não existe qualquer saída para que o fluxo se possa deslocar, a ferramenta confina-o no local de mais baixa temperatura, fazendo com que o fluxo fique confinado em um só ponto. Resumidamente o fluxo de calor tendo a ir da superfície mais quente para a superfície mas fria.

Na Figura 47 encontra-se o esquema que melhor retrata o comportamento dos fluxos, nas duas modelações.

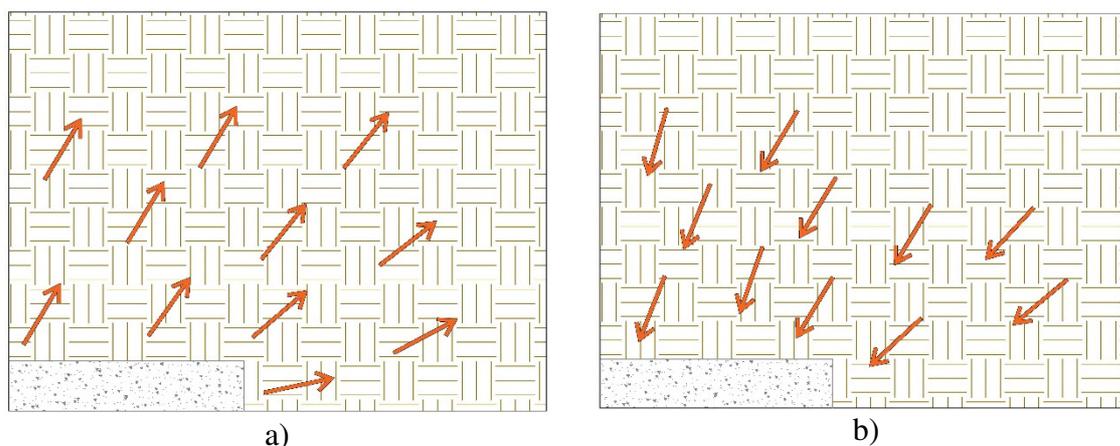


Figura 47. Comportamento do fluxo: a) aquecimento do solo; b) refrigeração do solo

Devido a este fato, o processo de modelação fica mais complicado devido à saturação do sistema na zona do elemento de betão, fazendo com quem este necessite de mais interações e tempo de modelação para poder obter a solução final (estabilização de temperatura).

É de realçar que caso o programa utilizá-se equações de energia, já seria possível realizar várias comparações de modo a obter parâmetros essenciais para a análise térmica do solo.

Um fator importante a considerar na modelação seria a atribuição de condutibilidades térmicas do solo diferentes para o caso de aquecimento e de refrigeração, visto que o solo

possui condutibilidades térmicas diferentes relativamente a estas duas situações, tal como fora analisado no tópico “Comparação entre aquecimento e refrigeração do solo”.

Como não se tinha dados para poder-se considerar condutibilidades diferentes, decidiu-se considerar a mesma condutibilidade térmica para as duas modelações.

Apesar dos resultados não serem os mais adequados para o caso de estudo, pode-se considerar que esta ferramenta permitiu obter uma perceção do comportamento do solo a nível qualitativo, em que foram demonstrados os bolbos de temperatura resultantes pelas variações de temperatura, algo que não é tao perceptível através da instrumentação.

É de realçar que a utilização desta ferramenta de cálculo simbolizou o início de um processo de modelação onde foi possível perceber-se as possíveis dificuldades na criação de um modelo numérico assim como no seu cálculo. Estas dificuldades permitem de certo modo, em uma fase posterior realizar-se uma análise numérica com uma ferramenta mais adequada, em que alguns dos obstáculos a nível de modelação já foram superados através do ANSYS Fluent.



## 6. CONCLUSÃO

O principal objetivo desta dissertação consistiu na análise da sustentabilidade de sistemas geotérmicos superficiais tendo a sua aplicação em climas da Europa do sul.

Em climas da Europa do sul existe a necessidade de obter calor do solo (fase de aquecimento do edifício), assim como o fornecimento ao mesmo (fase de arrefecimento do edifício), realizando-se assim um caso de estudo de modo a compreender o comportamento do solo às variações de temperaturas impostas por um sistema geotérmico.

O processo de estudo relativamente ao comportamento do solo consistiu em criar em laboratório uma instrumentação capaz de transmitir variações de temperatura ao solo a partir duma fonte calorífica (permutadores com água corrente) num provete de betão (simulando assim a situação de permutadores em estacas como circuito primário dum sistema geotérmico). Como a dissertação tem foco em climas da Europa do sul, considerou-se relevante a realização de duas instrumentações sendo uma relacionada com o aquecimento do solo (comportamento do sistema geotérmico no Verão) e outra com a refrigeração do mesmo (comportamento do sistema geotérmico no Inverno).

Apesar da instrumentação relativa ao aquecimento tenha decorrido como era esperado, não mostrando dificuldades de realização, verificou-se que para a instrumentação relacionada com a refrigeração do solo existiram fatores que podem ser melhorados numa situação futura, permitindo assim obter dados mais conclusivos dos que foram obtidos.

Como o processo de arrefecimento foi realizado através de gelo, verificou-se um grande problema para que fosse possível obter temperaturas constantes. Devido a este fator, teve-se que reduzir o tempo de instrumentação, visto que era necessário acrescentar gelo à água responsável pelo arrefecimento de forma periódica (1Kg de gelo de meia em meia hora), fazendo com que fosse impossível prolongar a instrumentação por muito tempo.

Com o tempo de instrumentação restrito a 24 horas, não foi possível obter muitas conclusões relativamente a este estudo. Para que houvesse uma grande quantidade de dados resultante da instrumentação, seria necessário ter um equipamento responsável apenas por manter a água à temperatura necessária para o arrefecimento do solo. Este equipamento iria tornar o modelo prático completamente autónomo.

Com todos os dados obtidos, realizou-se um estudo relativo às propriedades térmicas do solo, nomeadamente a condutibilidade térmica, velocidade de propagação da onda de calor, comportamento do solo quando sujeito a variações de temperatura e um estudo teórico relativo à distância entre elementos termoativos.

De entre todas as áreas de estudo referidas, verificou-se que apenas não se podia obter conclusões relativas à condutibilidade térmica, visto que as condições de instrumentação não eram as mais favoráveis para a análise desta propriedade e que se torna necessário pensar devidamente como se pode a partir de dados de aquecimento e arrefecimento de solo, conseguir determinar as suas propriedades de condutibilidade, o que está além do âmbito desta dissertação.

Para realizar-se um estudo apropriado relativamente à condutibilidade térmica do solo, seria necessário ter uma fonte de térmica que obtivesse uma variação temperatura instantânea ou se esta fosse pré aquecida ou refrigerada momentos antes de realizar-se a instrumentação.

Para se concluir que o solo utilizado neste estudo poderia ser ideal para a implementação de um sistema geotérmico, seria necessário a realização de mais ensaios de modo obter várias conclusões. Os ensaios em causa seriam a realização das mesmas instrumentações mas relativamente a diferentes graus de saturação do solo (parcialmente saturado e completamente saturado). Deste modo, e com a conjugação dos ensaios realizados nesta dissertação com dados de novos ensaios, pode-se obter uma eventual conclusão relativa ao solo.

Como é natural deveria ainda efetuar-se o ciclo de ensaios em solos muito homogêneos e em que se conhecem muito bem as suas propriedades, o que poderia ser conseguido com solos do tipo areia e do tipo argila, com curvas granulométricas em que o grau de pureza destes tipos de solos fosse alto.

Relativamente ao programa utilizado na modelação pode-se considerar, através da análise de resultados, que não se trata da ferramenta mais adequada para a simulação pretendida, o que era reconhecido à partida. Isto deve-se ao facto de a ferramenta numérica utilizar equações de fluxo em vez de utilizar equações de energia. Foi no entanto utilizado para verificação qualitativa das curvas de relação entre distância e temperatura encontrados nos ensaios, podendo assim exercitar-se uma modelação que utilizando-se um software mais apropriado poderia ter sido conseguido, no entanto os resultados foram de alguma maneira muito satisfatórios para o baixo grau de modelação de comportamento com que se partiu.

Assim, da análise qualitativa da componente numérica da dissertação, foi possível obter graus de transmissão de calor no solo do mesmo tipo que os observados nos ensaios.

É de realçar a escassez de casos de estudo relacionados com a geotermia em climas da Europa do sul, o que mostra o desconhecimento por parte da sociedade do enorme potencial da energia geotérmica para a climatização de edifícios, fazendo com que esta fonte de energia renovável ainda não seja muito utilizada.

Encerra-se o presente trabalho reafirmando a elevadíssima necessidade de existirem mais estudos relacionados com a geotermia, de modo a impulsionar a divulgação deste tipo de energia renovável e sustentável.



## 7. BIBLIOGRAFIA

### 7.1. Bibliografia principal

- [1]. E. C. Ramalho et al. / Comunicações Geológicas (2014) 101, Especial II, 837-840.
- [2]. ENAT- Energias Naturais - <http://www.enat.pt/pt/produtos/geotermia>. Última visualização a 25 de Novembro de 2015.
- [3]. Coelho, J. M. (2014). Eficiência de permutação térmica em estruturas termo ativas com recursos geotérmicos. Aveiro: Universidade de Aveiro.
- [4]. ArunClima - <http://www.arunclima.pt/bombas-de-calor.html>. Última visualização a 25 de Novembro de 2015.
- [5]. Trillo, Llopis; Angulo, Rodrigo, *Guía de la Energía Geotérmica*, 2008.
- [6]. Madureira, P. R. (2013). Apresentação da Plataforma Portuguesa de Geotermia Superficial. *1º Seminário da Plataforma Portuguesa de Geotermia Superficial, LNEG*, (pp. 1-13).
- [7]. Brandl, H., Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 2006. 56(2): p. 81-122.
- [8]. Trillo, G. L., & Angulo, V. R. (s.d.). *Guía de la Energía Geotérmica*. Madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- [9]. Geotermia de Portugal, Energia Natural - <http://www.geotermiadeportugal.pt.html>. Última visualização a 25 de Novembro de 2015.
- [10]. Agência para a Energia- ADENE- <http://www.adene.pt/>. Última visualização a 27 de Novembro de 2015.
- [11]. Portal Energia- Energias Renováveis- <http://www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-da-energia-geotermica>. Última visualização a 25 de Novembro de 2015.
- [12]. H. R. Thomas and S. W. Rees, "Measured and simulated heat transfer to foundation soils.," *Géotechnique*, vol. 59, no. 4, pp. 365-375, 2009.
- [13]. Cruz, R. J. (2011). Geotermia: Utilização da energia térmica do solo para climatização de edifícios. Aveiro: Universidade de Aveiro.
- [14]. Madeira, K. A. (2013). Energia biotérmica de águas residuais domésticas. Aveiro: Universidade de Aveiro.

## 7.2. Bibliografia de consulta

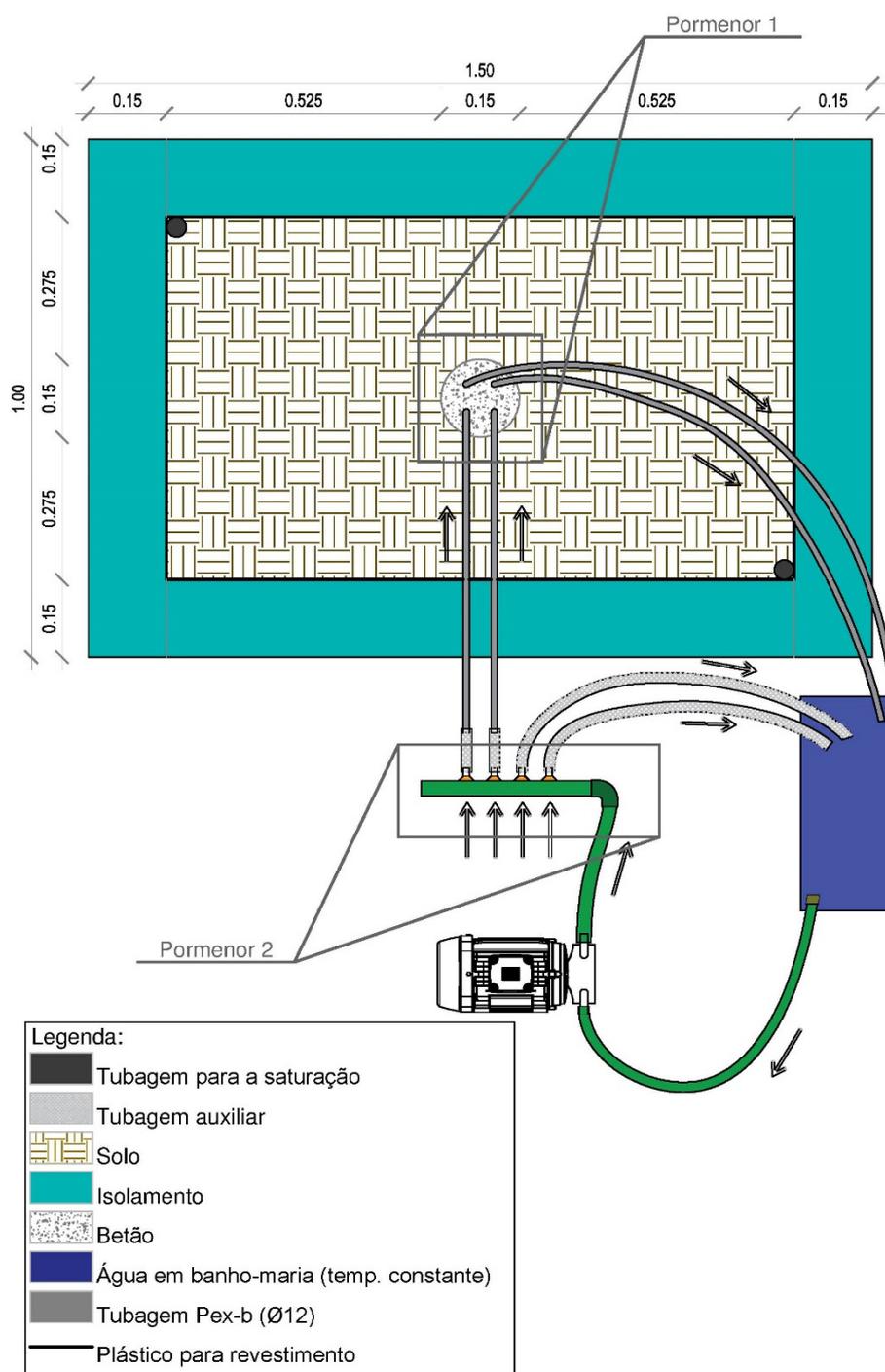
- Cunha, L. M. (2011). A Geotermia e Biotermia no contexto do desenvolvimento sustentável de edifícios escolares em Portugal. Aveiro: Universidade de Aveiro.
- Samento, I., & Matias, A. (Outubro de 2011). Sistemas AVAC em edifícios nnZEB- 11<sup>as</sup> Jornadas de Climatização. *Edifícios com necessidades quase nulas de energia (nnZEB)*. Lisboa.
- Diretiva 2010/31/EU de 19 de Maio. *Desempenho energético de edifícios*. Jornal Oficial da União Europeia.
- autores, D. (8 de Julho de 2013). Resumos de Apresentações. *1º Seminário da Plataforma Portuguesa de Geotermia Superficial - PPGS*. Alfragide: LNEG.
- Faria, P. Q. (Agosto de 2014). Complexo das Ciências de Comunicação e Imagem. *Instalações mecânicas de tratamento do ar ambiente e desenfumagem*. (Memória descritiva e justificativa I).
- Gonçalves, H. (13 de Outubro de 2011). Jornadas de Climatização- Ordem ds Engenheiros. *Em direção aos Edifícios de Balanço Energético Zero*.
- Lopes, H. (2014). *Sistemas Geotérmicos de Baixa Entalpia- Estudos de Caracterização Térmica*. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT).
- Plafferott, D. J., & Kalz, D. (2007). Thermo- active building systems. *High- comfort, energy- efficient heating and cooling of non- residential buildings*. Germany: Bine Informationsdienst.

## **ANEXO**

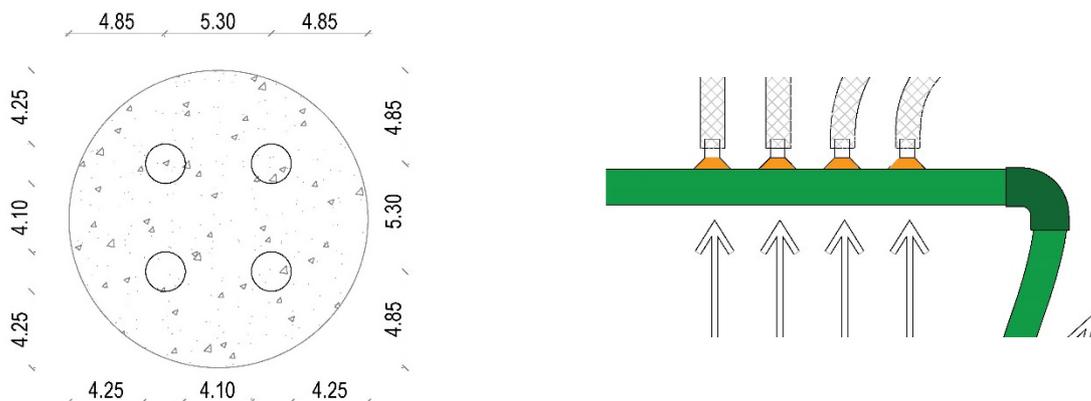


## ANEXO 1- PLANOS REALIZADOS EM AUTOCAD

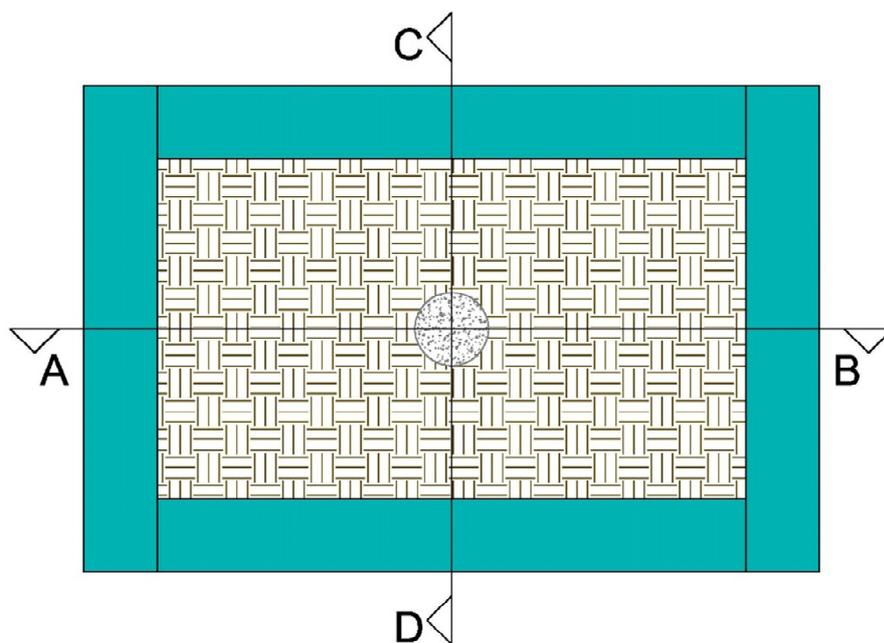
- Planta do modelo instrumental



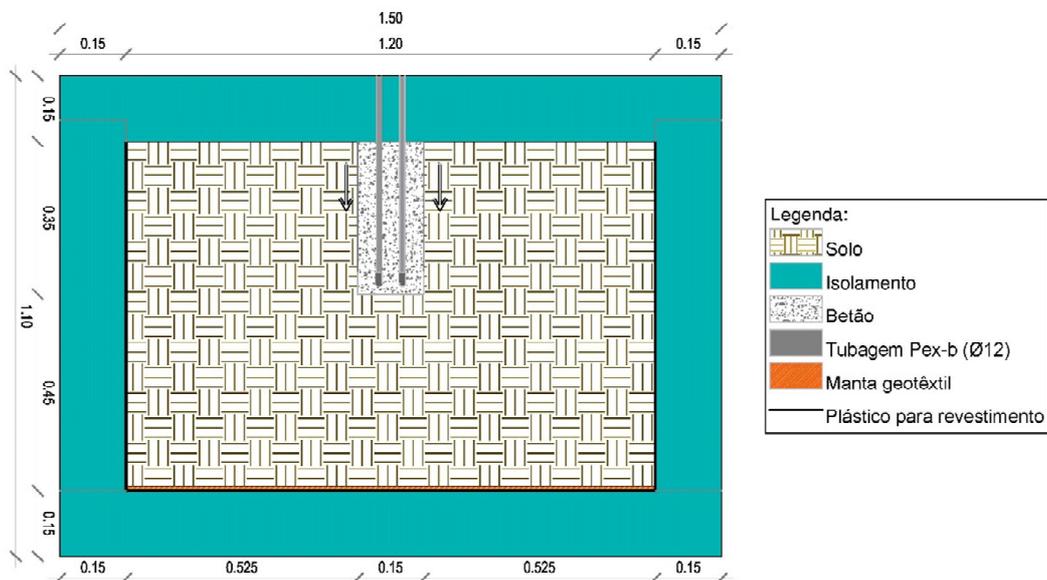
- Pormenor 1 e 2



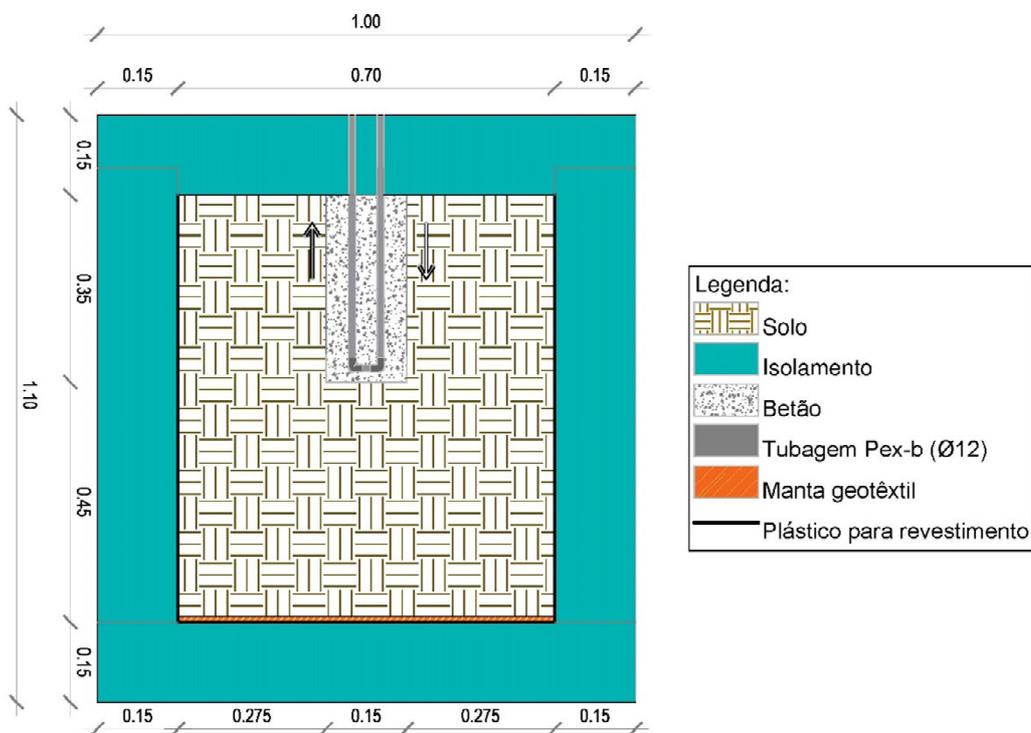
- Designação dos cortes realizados



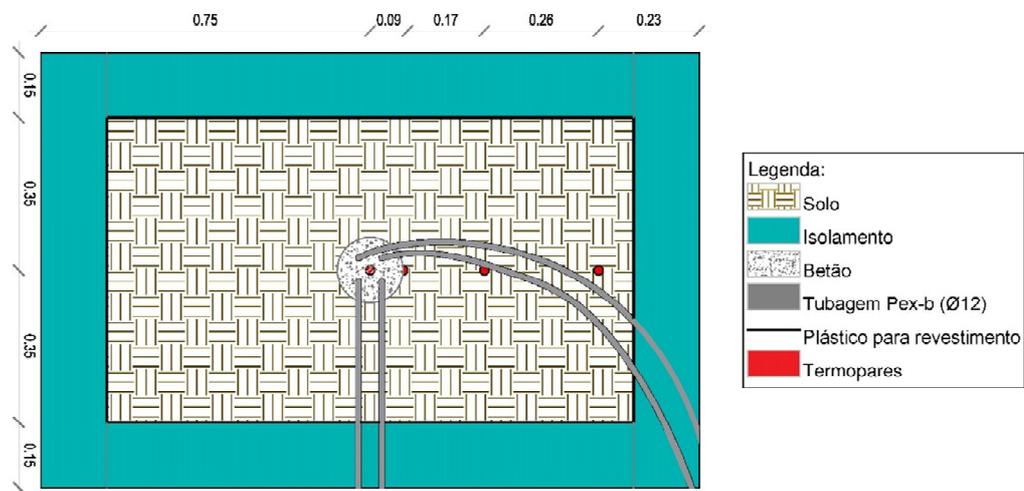
• Corte AB



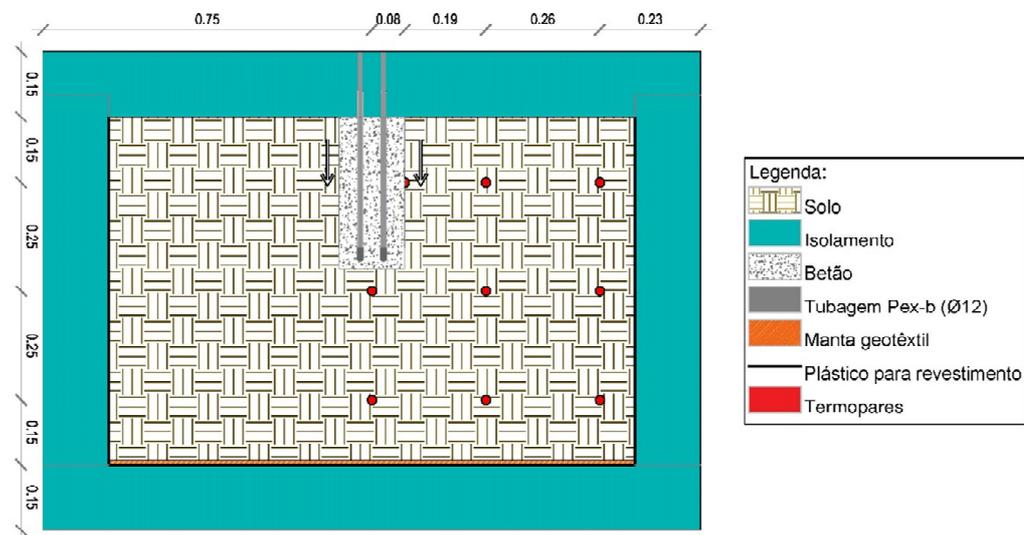
• Corte CD



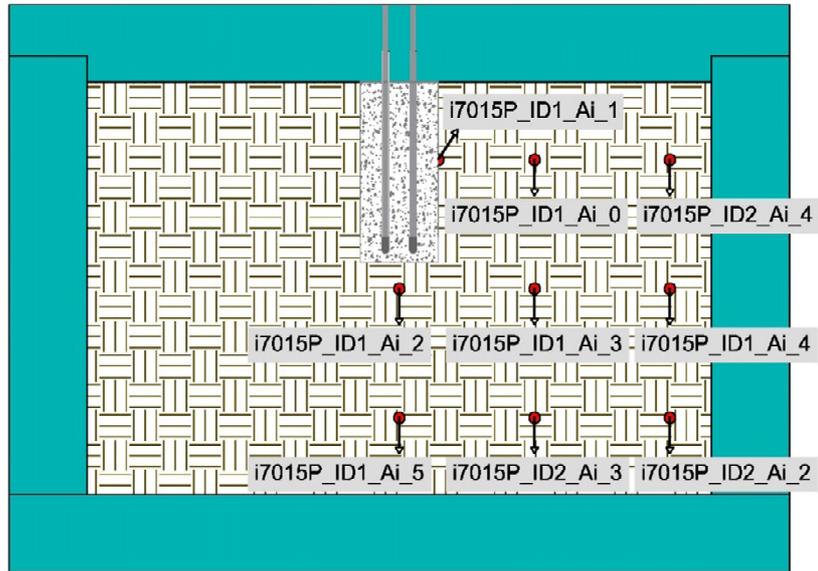
- Localização dos termopares em planta



- Localização dos termopares no corte AB



- Referências de cada termopar (sensor)





## ANEXO 2- REALIZAÇÃO DO PROVETE EM BETÃO

- Processo de caroteamento



- Colocação da tubagem no interior do provete



- Colocação do espaçador no topo do carote



- Acessório utilizado para a união das tubagens



- Provede de betão seco pronto a realizar-se as uniões



- Curva realizada com os acessórios



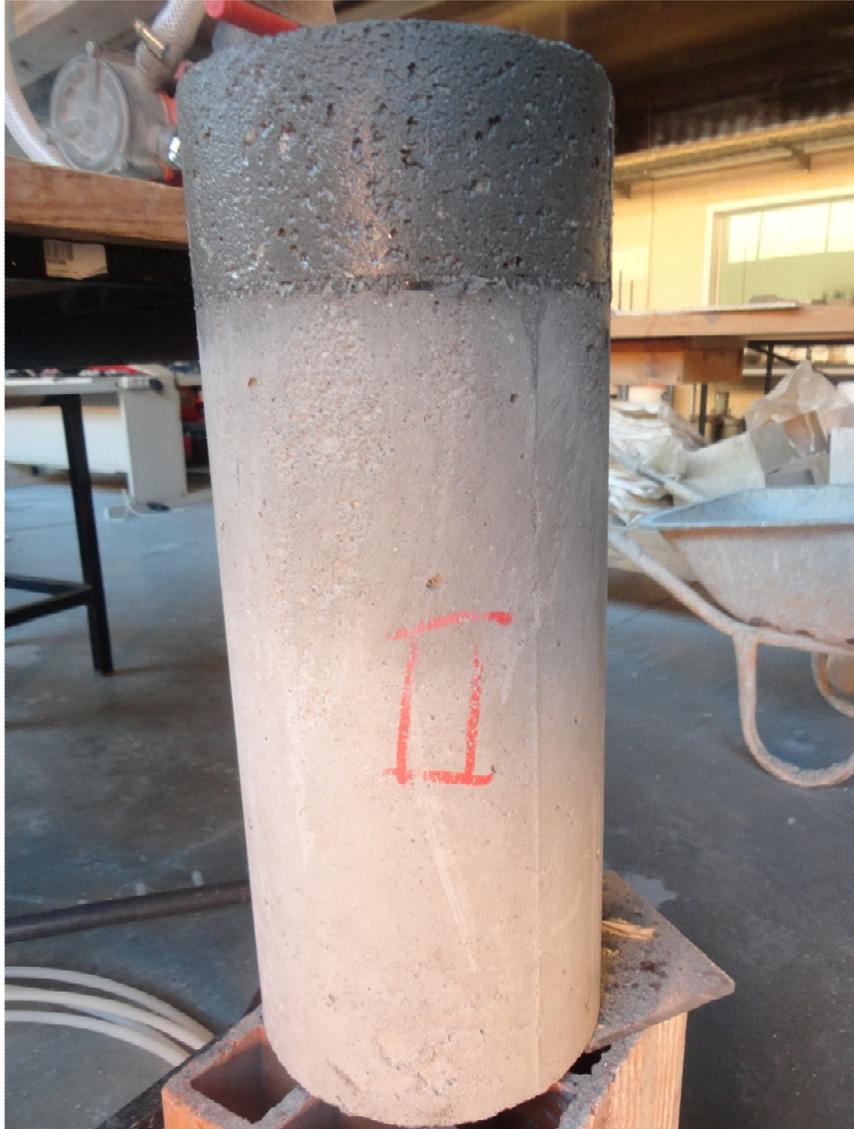
- Concretização das uniões



- Provede de betão pronto a betonado na zona das uniões



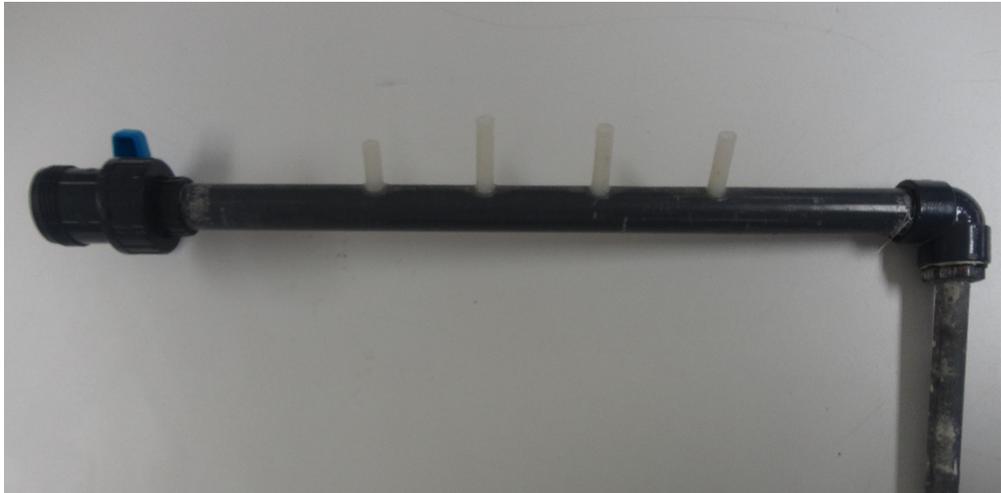
- Aspeto final do provete



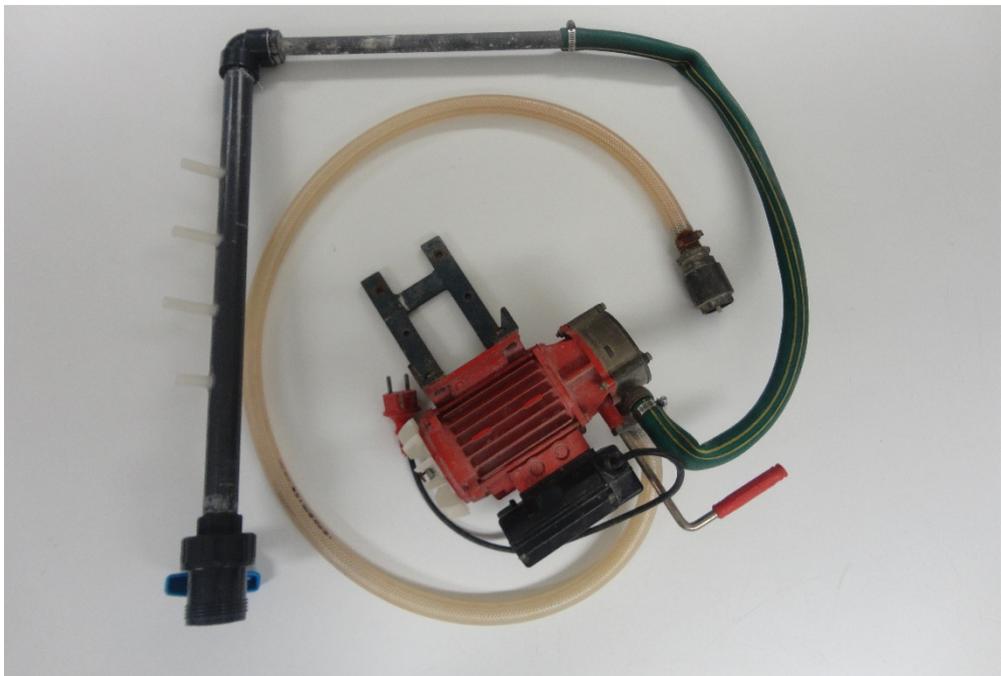


## ANEXO 3- REALIZAÇÃO DO SISTEMA DE BOMBAGEM

- Acessório de distribuição



- Ligação do acessório de distribuição à bomba



- Ligação do acessório de distribuição às tubagens do transporte de água



- Ligação das tubagens ao Banho-maria



- Sistema de bombagem todo montado





## ANEXO 4- MONTAGEM DO MODELO EXPERIMENTAL

- Recipiente (caixa) vazio



- Colocação das placas de XPS na base e laterais do recipiente



- Colocação do plástico sobre as placas de XPS



- Colocação da mata geotêxtil sobre a base de plástico



- Compactação das primeiras camadas de solo e colocação dos primeiros termopares



- Colocação dos tubos responsáveis pela saturação



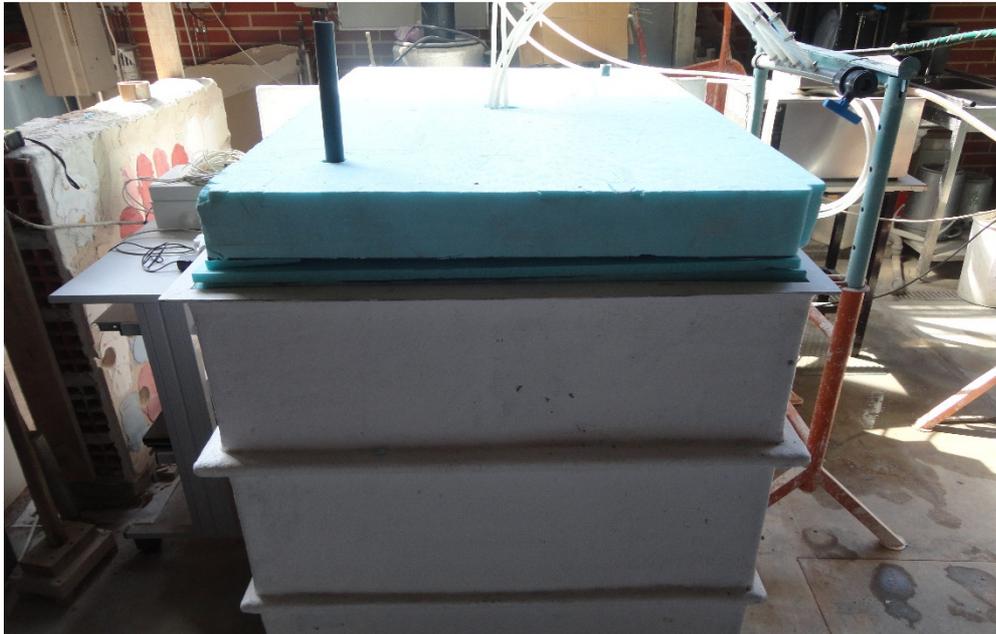
- Compactação do solo com o provete de betão já no local



- Remoção do plástico excedente



- Colocação da tampa de XPS



- Aspeto final do modelo instrumental

