AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE COBERTURAS VERDES SEMI-INTENSIVAS NA ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO

Gustavo Alexandre Pires Meneses

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores:

Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Professora Doutora Maria Cristina de Oliveira Matos Silva

Júri

Presidente: Professor Doutor João Pedro Ramôa Ribeiro Correia

Orientadora: Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Vogal: Doutora Laura Elena Aelenei

Novembro de 2015

Resumo

Eficiência e sustentabilidade, atualmente, são dois valores preponderantes na área da construção e as coberturas verdes são um meio para melhorar a qualidade do ar e de vida nos centros urbanos. O presente estudo é baseado na avaliação experimental do comportamento térmico de coberturas verdes semi-intensivas, durante a estação de verão. O caso de estudo escolhido inclui quatro tabuleiros instalados no Instituto Superior de Agronomia (ISA) com substratos e vegetações diferentes. Foram monitorizadas temperaturas, humidades relativas, fluxos de calor e radiação solar. Houve o cuidado de se escolher combinações de vegetação distintas de modo a ser possível avaliar diferentes efeitos de sombreamento e evapotranspiração. A influência da condutibilidade do solo também foi aferida pela escolha do tabuleiro com a mesma vegetação e com substratos distintos. Apresentam-se resultados para toda a campanha monitorizada e também estudos específicos para o dia mais quente para uma análise mais detalhada dos fenómenos. Concluiu-se que o braquipódio é bom protetor do solo contra a radiação por ter cores claras e elevada densidade de vegetação; o alecrim e o rosmaninho não apresentaram tão bons resultados por terem cores mais escuras, quando comparados com o braquipódio, e menor densidade vegetativa. Relativamente ao musgo, este não se revelou eficaz na proteção do solo por se encontrar seco. Foi verificado que o substrato, no período mais quente do dia, tem uma contribuição fundamental na redução dos fluxos de calor que atravessam a cobertura verde.

Palavras-chave: cobertura verde semi-intensiva, campanha de monitorização de verão, avaliação térmica, transmissão de calor.

Abstract

Efficiency and sustainability are nowadays two important values in construction and green roofs are a way to achieve it by improving air and life quality in city centers. The study herein is based on the experimental evaluation of the thermal performance of semi-intensive green roofs, during the summer season. The case study chosen includes four trays installed on the Instituto Superior de Agronomia (ISA) with different substrates and vegetation. Temperatures, relative humidities, heat fluxes and solar radiation have been monitored. There was the concern to choose different combinations of vegetation in order to be able to assess different effects of shading and evapotranspiration. The influence of soil conductivity was also measured by choosing the trays with the same vegetation and different substrates. Results are presented for all monitored campaign as well as specific studies of the hottest day for a more detailed analysis of the phenomena. The main conclusions were that the *brachypodium* is a good soil protector against solar radiation as it has light colors and high density of vegetation; the rosemary and the lavender, did not attain such good results because they have darker colors, when compared to *brachypodium* and lower vegetation density. Regarding the moss, it has not proven as an effective soil protector because it was dry. It has been found that the substrate in the hottest part of the day, has a major contribution on the reduction of the heat fluxes through the green roof.

Key-words: semi-intensive green roof, monitoring summer campaign, thermal evaluation, heat transmission.

Agradecimentos

Expresso aqui os meus agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para a realização desta dissertação.

À Prof.ª Maria da Glória Gomes e à Prof.ª Cristina Matos Silva, por toda a disponibilidade, interesse, empenho e transmissão de conhecimentos que permitiram enriquecer este trabalho.

Ao Instituto Superior Técnico, pela disponibilidade dos equipamentos para a realização da campanha experimental.

Ao Instituto Superior de Agronomia, agradeço a cedência do espaço para a realização da campanha experimental e especialmente à Prof.ª Teresa Paço pela disponibilidade, esclarecimento de dúvidas e divulgação de informação sempre que necessário.

Em especial à Inês, por ser mais do que uma amiga, por toda a ajuda, apoio e companhia ao longo do último ano. Todo o esforço, trabalho e tempo disponibilizado para me acompanhar neste percurso.

Aos meus amigos e colegas de escola e residência pela amizade e incentivo demonstrado ao longo do percurso universitário.

Por fim, agradeço aos meus pais e irmão por tudo o que me permitiram alcançar. Por todo o apoio, sacrifícios, motivação e ensinamentos que me transmitiram, permitindo tornar-me na pessoa que sou hoje.

Índice

1. Introdução 1
1.1 Enquadramento 1
1.2 Objetivos e Metodologia 2
1.3 Organização do trabalho 2
2. Estado da Arte 5
2.1 Evolução histórica 5
2.2 Caracterização das coberturas verdes 8
2.2.1 Constituição das coberturas 8
2.2.2 Vantagens/Desvantagens e funcionalidade 10
2.3 Desempenho térmico de coberturas verdes 11
3. Caso de Estudo 21
3.1 Amostra 21
3.1.1 Localização 21
3.1.2 Caracterização dos tabuleiros 22
3.2 Procedimento experimental 28
4. Análise e Discussão de Resultados 35
4.1 Caracterização da campanha de monitorização 35
4.2 Estudo do comportamento térmico durante a campanha de monitorização 37
4.3 Estudo do comportamento térmico no dia tipo – D+Q 44
5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros 55
5.1 Conclusões 55
5.2 Limitações e propostas de desenvolvimentos futuros 57
6. Referências Bibliográficas 58

Índice de Figuras

Figura 3.1: Implantação do ISA com Bairro de Alvito (Este), Cç da Tapada (Sul), Palácio da Ajuda (Oeste) e o Parque Florestal do Monsanto (Norte) (ISA, 2015). 21

Figura 3.2: Pormenor do isolamento: (a) envolvente: lateral e chão da cobertura; (b) cintas e travamento; (c) zona com (1) e sem (2) isolamento no tabuleiro. 22

Figura 3.3: Compartimentos com tabuleiros de coberturas verdes: (a) planta; (b) corte AA' (Dimensão em [mm]) 23

Figura 3.4: Detalhe do perfil das camadas dos tabuleiros, em milímetros. 24

Figura 3.5: (a) *Brachypodium Phoenicoides*; (b) Mapa da distribuição da espécie em Portugal (Porto, et al., 2015). 25

Figura 3.6: (a) *Rosmanirus Officinalis*; (b) Mapa da distribuição da espécie em Portugal (Porto, et al., 2015) 26

Figura 3.7: (a) *Lavandula Luisieri*; (b) Mapa da distribuição da espécie em Portugal (Carapeto, et al., 2015) 26

Figura 3.8: *Pleurochaete*. 27

Figura 3.9: Fotografia de cada tabuleiro: (a)Tabuleiro T3; (b)Tabuleiro T5; (c)Tabuleiro T6; (d)Tabuleiro T7. 28

Figura 3.10: Ilustração de um tabuleiro, em planta, com a localização do equipamento. 29

Figura 3.11: Ilustração de um tabuleiro, em perfil (corte AA'), com a localização do equipamento. 30

Figura 3.12: (a)Pormenor das diferentes profundidades dos termopares Th2, Th1 e Tse; (b)Localização da zona com e sem isolamento no tabuleiro e piranómetro. 30

Figura 3.13: Termopares: Tsi^{wi},*x*, Tsi,*x* e Ti,*x* e fluxímetros: Fl^{wi},*x* e Fl,*x*. 31

Figura 3.14: Termohigrómetros no interior: (a)Rotronic (Ti,*x*,R); (b)Tinytag (Ti,*x*,T). 31

Figura 3.15: *Data loggers* utilizados: (a)Campbell; (b)Delta T. 32

Figura 4.1: Temperatura interior de todos os tabuleiros, temperatura exterior e radiação solar. 38

Figura 4.2: Variação da temperatura (a) ambiente interior, (b) superficial interior e (c) superficial exterior de todos os tabuleiros relativa ao tabuleiro de referência. 39

Figura 4.3: Fluxo de calor da zona com e sem isolamento e radiação solar: (a) Tabuleiro T5; (b) Tabuleiro T7. 42

Figura 4.4: Humidade relativa e temperatura: (a) Interior do tabuleiro de referência (Hi,7 e Ti,7); (b) Exterior (He e Te). 43

Figura 4.5: Precipitação do mês de junho – período da campanha, 15 a 30 de junho (dados de meteoIST). 44

Figura 4.6: D+Q: (a) Temperatura interior de todos os tabuleiros, temperatura exterior e radiação solar; (b) Temperatura superficial exterior de todos os tabuleiros e radiação solar. 46

Figura 4.7: Sombreamento das células: (a) Planta a fazer sombreamento sobre a célula Tse,6 (fotografia tirada após 18:30); (b) Densidade vegetativa sobre a célula Tse,5. 47

Figura 4.8: Fluxo de calor da zona com e sem isolamento nos tabuleiros T5 e T7 e radiação solar no D+Q. 48

Figura 4.9: Fluxo de calor da zona com isolamento do tabuleiro de referência e fluxo de calor calculado da placa de isolamento com radiação solar no D+Q. 50

Figura 4.10: Temperaturas do substrato do tabuleiro de referência na (a)zona com isolamento e na (b)zona sem isolamento e a radiação solar no D+Q. 51

Figura 4.11: Temperatura do substrato dos quatro tabuleiros em profundidade em várias horas do D+Q: (a1) T3 c/ isolamento; (a2) T3 s/ isolamento. 52

Figura 4.12: Temperatura do substrato dos quatro tabuleiros em profundidade em várias horas do D+Q: (b1) T5 c/ isolamento; (b2) T5 s/ isolamento; (c1) T6 c/ isolamento; (c2) T6 s/ isolamento; (d1) T7 c/ isolamento; (d2) T7 s/ isolamento. 53

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Classificação de coberturas verdes de acordo com o tipo de uso, construção e requisitos de manutenção (Raji et al., 2015). 9

Tabela 2.2: Quadro-resumo de estudos anteriores em coberturas verdes em climas frios. 12

Tabela 2.3: Quadro-resumo de estudos anteriores em coberturas verdes em climas tropicais. 15

Tabela 2.4: Quadro-resumo de estudos anteriores em coberturas verdes em climas mediterrânicos. 17

Tabela 3.1: Composição dos substratos. 24

Tabela 3.2: Características dos substratos. 24

Tabela 3.3: Quadro-resumo das características da vegetação. 27

Tabela 3.4: Quadro-resumo dos substratos e vegetação de cada tabuleiro. 28

Tabela 3.5: Equipamento no tabuleiro T3 e T5. 32

Tabela 3.6: Equipamento no tabuleiro T6, T7 e no exterior. 33

Tabela 4.1: Valores para cálculo do coeficiente de absorção. 36

Tabela 4.2: Máxima temperatura exterior e radiação solar em cada dia 37

Tabela 4.3: Valores médios, máximos e mínimos de todos os parâmetros medidos nos quatro tabuleiros no D+Q. 45

Nomenclatura e acrónimos

A	Área da secção
D+Q	“Dia Mais Quente”
dT	Diferença de temperaturas
D*x*	Espessura do material
E	Espessura
ET_0	Evapotranspiração de referência
Fl,*x*	Fluxo de calor na zona sem isolamento no tabuleiro *x*
Fl^{ic},7	Fluxo de calor calculado da placa de isolamento térmico do tabuleiro T7
Fl^{wi},*x*	Fluxo de calor na zona com isolamento no tabuleiro *x*
He	Humidade relativa exterior
Hi,*x*	Humidade relativa interior do tabuleiro *x*
h_{se}	Coeficiente de transferência de calor da superfície exterior
ISA	Instituto Superior de Agronomia
IST	Instituto Superior Técnico
K_2O	Óxido de potássio
Ksat	Condutividade hidráulica saturada
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MO	Matéria orgânica
Mva	Massa volúmica aparente
N	Azoto
P_4O_{10}	Pentóxido de fósforo
Q	Taxa de transferência de calor por unidade de tempo
q”	Fluxo de calor
R	Rotronic
RS	Radiação solar em plano horizontal
Ser	Resistência da superfície exterior
R_{si}	Resistência da superfície interior
R_T	Resistência térmica
S1	Substrato nº1
S2	Substrato nº2
T	Tinytag
T3	Tabuleiro nº 3
T5	Tabuleiro nº5
T6	Tabuleiro nº6
T7	Tabuleiro nº7
Te	Temperatura exterior
Te,*x*	Temperatura exterior no tabuleiro *x*
Th1,*x*	Temperatura do substrato a meia altura na zona sem isolamento no tabuleiro *x*
$Th1^{wi}$,*x*	Temperatura do substrato a meia altura na zona com isolamento no tabuleiro *x*
Th2,*x*	Temperatura na base do substrato na zona sem isolamento no tabuleiro *x*

$Th2^{wi},x$	Temperatura na base do substrato na zona com isolamento no tabuleiro *x*
Ti,x	Temperatura interior do tabuleiro *x*
Tse,x	Temperatura superficial exterior na zona sem isolamento no tabuleiro *x*
Tse^{wi},x	Temperatura superficial exterior na zona com isolamento no tabuleiro *x*
Tsi,x	Temperatura superficial interior na zona sem isolamento no tabuleiro *x*
Tsi^{wi},x	Temperatura superficial interior na zona com isolamento no tabuleiro *x*
$T_{sol\text{-}ar}$	Temperatura sol-ar
Wi	*With insulation*
X	Variável aleatória representativa de cada tabuleiro, *x* = [3, 5, 6, 7]
A	Absortividade
Λ	Condutibilidade térmica do material
P	Refletividade
T	Transmissividade

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Um dos temas cuja importância tem mudado nos últimos anos é a sustentabilidade ambiental, principalmente devido ao impacto do homem no planeta. Apesar deste ter consciência do problema, as suas ações não são suficientes para o solucionar (NWEI, 2015).

Com isto, existe a necessidade de estudar soluções que permitam minimizar os impactos do homem no planeta. Soluções pensadas para diminuir a poluição atmosférica, a desflorestação (e.g. indústria agropecuária, combustível, construção, etc.), entre outras (Simbiótica, 2015).

Uma das possíveis soluções construtivas para mitigar estes impactos é a utilização de coberturas verdes. Estas permitem reutilizar parte das áreas retiradas à natureza para construção criando espaços verdes em meios urbanos e, simultaneamente, potenciar a transformação de dióxido de carbono em oxigénio. A questão da concentração populacional e as consequências que daí advêm, em algumas cidades, é acentuada ao ponto de aparecem as chamadas "ilhas de calor" (EcoD, 2010), cuja designação se prende com a distribuição espacial e temporal de temperaturas sobre uma cidade, apresentando um máximo ao centro e diminuindo à medida que se afasta do mesmo, daí a origem do nome "ilha de calor". Juntamente a este fenómeno aparece um tipo de poluição, denominado por smog, que surge nos centros urbanos em forma de um nevoeiro, devido à elevada concentração de poluentes provenientes da queima incompleta dos combustíveis fósseis (à base de petróleo). Este tipo de poluição causa sérios danos à saúde do Homem, mais precisamente ao aparelho respiratório (Souza, 2011).

Para além do aumento das zonas verdes, as coberturas ajardinadas podem fornecer um bom isolamento térmico, retendo as elevadas temperaturas no verão, complementado pelo efeito de sombra proporcionado pela vegetação e no inverno protegendo as habitações das baixas temperaturas. Isto pode resultar na redução dos consumos energéticos para aquecimento e arrefecimento dos ambientes interiores dos edifícios (Liu, 2003).

Com as alterações climáticas a tornarem-se cada vez mais acentuadas, uma das consequências que se têm vindo a verificar são verões e invernos mais rigorosos, existindo tempestades e chuvas torrenciais com maior frequência e intensidade levando a inundações e derrocadas. Quando comparado com uma superfície impermeável, o solo apresenta a vantagem de reter parte da água das chuvas, tornando o seu escoamento mais lento. Ao aumentar as zonas verdes pode estar a contribuir-se para a diminuição de cheias, entupimentos e sobrecargas nas redes de esgotos, nas zonas urbanas, por reter parte dessa água nos solos das coberturas (Simmons et al., 2008).

Outra vantagem da implementação de coberturas verdes é o aumento da qualidade do ar e ao mesmo tempo uma melhoria no aspeto estético dos edifícios, acabando, por vezes, a resultar numa melhoria na qualidade de vida (EcoD, 2010). Contudo, os custos de implantação e manutenção, bem como a sobrecarga imposta às coberturas dos edifícios e o risco de infiltrações representam os

contratempos desta solução, sendo necessário avaliar se as vantagens justificam a utilização da mesma. Por isto, os estudos nesta temática têm vindo a aumentar mas continuam a ser reduzidos tornando-se pertinente continuar e aprofundar os mesmos nos seus vários âmbitos.

Esta dissertação de mestrado insere-se neste tema e visa, em concreto, o estudo da avaliação experimental do comportamento térmico de coberturas verdes semi-intensivas.

1.2 Objetivos e Metodologia

Esta dissertação assenta sobre uma avaliação experimental do comportamento térmico de uma cobertura verde semi-intensiva. Desta forma, para a execução da parte experimental foram utilizados os tabuleiros usados no projeto NativeScapeGR (, como caso de estudo. Os mesmos encontram-se localizados no Instituto Superior de Agronomia (ISA), na Tapada da Ajuda.

Para esta situação experimental pretende-se avaliar o comportamento térmico dos tabuleiros experimentais na estação de verão, nomeadamente:

- Comparar o comportamento térmico dos dois tipos de solos;
- Comparar o comportamento térmico das zonas com e sem isolamento;
- Analisar a influência de diferentes espécies de vegetação (i.e. braquipódio, alecrim, rosmaninho e pleurochaete);
- Identificar outros parâmetros que influenciem o comportamento térmico de coberturas verdes;
- Perceber o comportamento térmico de um tabuleiro experimental em situação desfavorável (e.g. dia mais quente e/ou de maior radiação).

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho é composto por um total de cinco capítulos: Introdução, Estado da Arte, Caso de Estudo, Análise e Discussão de Resultados e Conclusões e Desenvolvimentos Futuros. A estes capítulos acresce as Referências Bibliográficas.

Neste primeiro capítulo é feito o enquadramento do trabalho indicando-se a pertinência do mesmo, os seus objetivos e elaborando uma breve descrição da sua organização.

No segundo capítulo apresenta-se o Estado da Arte. Este capítulo inicia com a evolução histórica das coberturas verdes e como as mesmas foram utilizadas pelas várias culturas ao longo dos tempos, apresentando-se em seguida algumas definições e realizando a explicação de conceitos considerados pertinentes. Finalmente, são apresentados alguns estudos previamente realizados, nomeadamente em climas frios, tropicais e mediterrânicos.

O capítulo três contempla a informação sobre o caso de estudo: a descrição do local, as caraterísticas gerais dos tabuleiros, dos tipos de solos e vegetação, e posteriormente uma descrição individual de cada tabuleiro. É realizada uma breve descrição do procedimento com a descrição e localização dos equipamentos.

No capítulo quatro são apresentados, descritos e discutidos os resultados obtidos de todo o período da campanha e posteriormente os dados apenas referentes a um dia tipo para melhor análise de alguns fatores.

No último capítulo, são apresentadas as conclusões gerais de toda a dissertação, contemplando as principais conclusões retiradas do cruzamento dos dados obtidos com os estudos analisados inicialmente e sugestões para estudos vindoiros.

Após os capítulos enunciados podem ser encontradas as referências bibliográficas utilizadas na elaboração deste documento.

2. Estado da Arte

Inicialmente, faz-se uma referência histórica à solução construtiva de coberturas verdes e definem-se os tipos de coberturas experimentais no âmbito do comportamento térmico de coberturas verdes, bem como as suas principais conclusões. Por fim, são apresentados estudos previamente realizados em climas frios, tropicais e mediterrânicos.

2.1 Evolução histórica

As primeiras descrições de coberturas verdes e jardins verticais remontam aos Jardins Suspensos da Babilónia, sobre os quais existe alguma controvérsia quanto à localização, a quem terá mandado construir e se terão de facto existido ou não. No artigo de Robinson (2013) sobre os jardins da Babilónia, este escreve que se pensa que os mesmos terão sido mandados construir por Nebuchadnezzar II no século VI a.C. e irrigados pelo rio Eufrates, acrescentando contudo que não foram encontradas evidências dos jardins nas escavações efetuadas pela equipa alemã, liderada por Robert Koldewey, de 1898 a 1917. Não há qualquer referência aos jardins nas inscrições cuneiformes de Nebuchadnezzar, e as primeiras menções aos mesmos provêm de autores Romanos, cinco séculos depois, como Diodorus Siculus e Strabo.

Dalley (2013) sustenta que os jardins suspensos de facto existiram, tal como as outras seis Maravilhas do mundo antigo, e estariam localizados na Babilónia perto das montanhas e cataratas próximas do rio Tigre, em Nínive, a norte no reino assírio de Sennacherib (704-681 a.C.).

Datados aproximadamente da mesma altura que estes jardins, na Noruega e na Islândia foram encontrados vestígios de construções que utilizavam vegetação como cobertura. Aqui, eram utilizadas várias espécies de relva, conhecidas pela sua durabilidade e isolamento térmico, nestas zonas mais frias e que ainda hoje são tradição (Stater, 2008).

Sabe-se que as coberturas verdes foram utilizadas pelos Romanos como resposta à pressão populacional das áreas urbanas (Farrar, 1996) pois a erupção do Monte Vesuvius, a 79 d.C., soterrou a antiga cidade deste império, Pompeia, com 4m de lava, garantindo a preservação, quase perfeita, de um edifício com terraços que se assemelha à definição de coberturas verdes da atualidade. Esta civilização colocava, também, árvores no topo dos seus edifícios institucionais, como os mausoléus de Augustus e Hadrian (Pieper, 1987). Jashemski (1979) escreve sobre as videiras que, em Pompeia, os lojistas cultivavam nas suas varandas superiores.

Também os Vikings, por volta do século VIII d.C., utilizavam a vegetação (e.g. turfa) como forma de proteção da chuva e do vento e para isolar telhados e paredes (Peck et al., 1999); Donnelly (1992) acrescenta o uso ocasional de algas para isolar os telhados. No Canadá há vários exemplos exportados dos Vikings e dos franceses, de telhados arrelvados (no original *sod roofs*).

Nos séculos XIII, XIV e XV foram encontrados alguns registos históricos de coberturas verdes em várias cidades de França e Itália, sobretudo em palácios e edifícios religiosos onde estas eram implementadas com o objetivo de ornamentar os edifícios, como o exemplo das "paredes cortadas de vegetação" presentes na sala de jantar exterior do Hotel Prince de Condè (De Lorme, 1996).

Durante a época renascentista, terraços ajardinados e telhados verdes eram comuns na cidade italiana de Génova (Gorse, 1983). A criação de um dos primeiros e melhores jardins de cobertura é datada desta altura através do Papa Piu II, cujo papado durou de 1458 a 1464. Durante este período, o Papa procurou criar um jardim no centro de Corsignano, a 80 km a sul de Florença (Simões, 2012). Renomeou a cidade para Pienza e contratou o arquiteto florentino Bernardo Rossellino, para projetar um novo centro na cidade, bem como os seus edifícios. No espaço de três anos foi construído um centro eclesiástico completo, que ainda hoje permanece exatamente igual ao século XV, com a praça da cidade rodeada por uma catedral, palácios para os cardeais, e um campanário. O próprio palácio do Papa – Palácio de Piccolomini – é o que contém o jardim de cobertura.

Jardins verticais, na forma de jardins suspensos existiam no México pré-colombiano (Goode, 1986), India, e em algumas casas espanholas dos séculos XVI e XVII no México (Flower, 1937). Na Rússia, um extenso jardim suspenso com dois pisos foi instalado na cobertura do palácio de Kremlin, em Moscovo, no século XVII. Possuía uma área superior a 4 hectares e foi construído no mesmo piso dos quartos (Simões, 2012). Apresentava mais dois terraços adicionais que quase desciam até à extremidade do Rio de Moscovo. Todos estes jardins, superiores e inferiores, foram construídos sobre as abóbadas do edifício. O jardim superior tinha 122m de comprimento e era cercado por uma parede de pedra aberta com alguns vãos enquanto o jardim inferior, construído em 1681, sobre o edifício em pedra que se encontrava mais próximo do rio, apresentava uma área de 2,4 hectares – nesta altura Czarista, os jardins nas coberturas eram considerados como uma caraterística de ostentação de riqueza (Costa, 2010). Em 1773, o palácio original e seus jardins foram destruídos para dar lugar ao novo palácio do Kremlin.

Em 1880, na Alemanha, as coberturas dos edifícios residenciais da classe baixa eram constituídas principalmente por alcatrão (i.e. um recurso inflamável). De forma a diminuir o risco de fogo, Koch, empreiteiro, decidiu juntar areia e gravilha ao substrato, dando assim origem às coberturas verdes – uma vez que as sementes existentes no conjunto começaram a desenvolver-se nas superfícies das coberturas (Miller, 2008).

Karl Rabbitz, na mesma altura e no mesmo país, construiu um jardim de cobertura numa casa de classe média em Berlim. Esta técnica construtiva era altamente invulgar para o Norte da Alemanha, pois o clima é propício a invernos frios e chuvas que abundam todo o ano. Percebendo a natureza dos problemas dos jardins de cobertura, Rabbitz, usou cimento vulcanizado para impermeabilizar a base do jardim. Esta técnica foi apresentada como modelo do ideal de construção verde, inovadora na área da impermeabilização, na Exposição Mundial de Paris, em 1867.

A partir do início do século XIX, as coberturas verdes começaram a surgir em maior escala, deixando de ser utilizadas exclusivamente nos edifícios habitacionais. Em concreto, durante o período da 2ª Guerra Mundial e da Guerra Fria, estas coberturas tinham a função de proteção militar, sendo

utilizadas para camuflar aeródromos militares e para proteger os abrigos bomba contra os ataques nucleares.

No século XX, as técnicas construtivas de coberturas planas foram desenvolvidas e implementadas em grande parte dos edifícios, fazendo com que se tornasse possível a colocação de maiores cargas nas coberturas, isto levou à evolução da tecnologia das coberturas verdes (Figueiredo, 2015) e permitiu que estes telhados e jardins pudessem ser encontrados a enfeitar o aeroporto de S. Petersburgo na Rússia bem como as casas de Tashkent (Uzbequistão), Tbilisi (Geórgia), e Dushanbe (Tajiquistão) (Titova, 1990). Em meados do mesmo século, já muitos países tinham adotado as coberturas verdes como solução – principalmente na zona Norte da Europa: Alemanha, Suíça, Áustria e Escandinávia – devido ao interesse crescente da qualidade do ambiente urbano.

Na década de 70, continuaram as investigações relativas aos diferentes componentes das tecnologias das coberturas verdes, e em 1975, com a criação da primeira sociedade com diretrizes para as coberturas verdes, que ficou conhecida por FLL (*Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau* – em português Sociedade Alemã de Pesquisa, Desenvolvimento e Construção da Paisagem), iniciou-se uma investigação significativa dos diferentes componentes de uma cobertura verde, de onde resultaram desenvolvimentos e melhorias de diversos elementos constituintes das mesmas: membranas anti-raiz, membranas impermeáveis, sistemas de drenagem de águas pluviais, substratos e vegetação (Midden et al., 2011). As diretrizes da FLL são normalmente utilizadas na Europa, para a implementação e construção de coberturas verdes, e só foram introduzidas na América do Norte, pela primeira vez em abril de 2002, não sendo inicialmente consideradas com aplicáveis (Jörg Breuning e Green Roof Service LLC, 2015), sendo utilizadas, na altura, as diretrizes da ASTM (*Association of Standards and Testing Materials*), a qual indica as terminologias utilizadas, os requisitos técnicos de construção (e.g. diferentes tipos de camadas, cargas estruturais), os tipos de sistemas nas coberturas e os tipos de plantas que devem ser utilizados bem como a sua manutenção.

Em 1997, a Áustria, a Alemanha e a Suíça criaram uma Federação Europeia de Associações de coberturas verdes (EFB – *Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung*, no original em Alemão) cuja principal função é promover a utilização de coberturas e fachadas verdes na Europa, devido à sua reconhecida melhoria da qualidade de vida nas cidades. Até hoje, esta Federação tem crescido com a contribuição das associações de vários países, como a Holanda, Bélgica, Países Escandinavos, Reino Unido, entre outros, para a promoção deste tipo de solução construtiva (EFP, 2015).

Desde a década de 80, a instalação de coberturas verdes pode ser considerada uma área em franca expansão com uma indústria bastante organizada. O reconhecimento público a nível europeu, estadunidense e canadiano das vantagens deste tipo de solução, conduziu ao estabelecimento de incentivos governamentais e também alguma legislação para obrigação da implementação deste tipo de cobertura e para quem adote este tipo de solução construtiva (Design for London, 2008).

A Alemanha é o maior investidor tecnológico a nível das coberturas verdes onde estas representam o equivalente a 14% do total de coberturas planas (Castleton et al., 2010). Em Berlim

existe uma política de obrigatoriedade à construção de zonas verdes que é controlada através de um sistema pioneiro denominado de fator de área biótopo (no original *Biotope Area Factor* – BAF) que representa a razão entre a área ecologicamente efetiva (i.e. jardins, coberturas verdes, etc.) e a área total de implantação do edifício (Design for London, 2008). Para edifícios novos, este fator tem de ser igual ou superior a 0,6.

Em Portugal não existe, atualmente, qualquer incentivo governamental ou algum regulamento sobre a construção de coberturas verdes. Apesar disso, existem alguns exemplos deste tipo de construção: ETAR de Alcântara e Fundação Calouste Gulbenkian, ambas em Lisboa, e a estação de metro da Trindade, no Porto.

Pode então concluir-se que desde 600 a.C. à atualidade as coberturas verdes têm estado presentes nas várias civilizações e culturas quer por motivos estéticos quer por isolamento térmico e proteção face aos elementos e, mais recentemente, ambientais devido às preocupações dos governos se focarem, cada vez mais, na qualidade da vida urbana e na sustentabilidade do planeta.

2.2 Caracterização das coberturas verdes

2.2.1 Constituição das coberturas

A cobertura verde é uma solução para a plantação do topo das edificações (lajes e telhados) e pode ser parcialmente ou totalmente coberta por uma camada de solo e vegetação, podendo suportar vegetação mais rasteira, plantas, arbustos e árvores, dependendo da sua categoria.

De um modo simplista, uma cobertura verde é caraterizada por ter instalada sobre a laje estrutural e camadas intermédias de membranas protetoras e de isolamento, uma camada de substrato com vegetação. Em Portugal, são aplicadas várias terminologias para este tipo de coberturas: coberturas verdes, coberturas ajardinadas e coberturas vivas. Neste trabalho, usa-se coberturas verdes.

As coberturas verdes podem ser divididas em três categorias consoante as espessuras da camada de solo e da utilização da cobertura (acessível ou não) bem como dos custos de manutenção (Wark e Wark, 2003; Henry e Frascaria-Lacoste, 2012): extensiva, semi-intensiva e intensiva. Atualmente, o tipo de coberturas verdes mais utilizado são as coberturas extensivas. Este tipo de coberturas caracteriza-se por ter uma camada de solo pouco espessa (i.e. entre 6 e 20cm – ver Tabela 2.1), o que facilita a implementação em obra, e contêm um ou dois tipos de vegetação. As coberturas do tipo extensiva, por norma requerem pouca manutenção e não são acessíveis e por isto são, também, menos dispendiosas (Fioretti et al., 2010).

Por outro lado, as coberturas intensivas são caracterizadas por terem uma maior espessura (mais de 15cm – ver Tabela 2.1) e poderem conter diversos tipos de vegetação (e.g. árvores). Por norma são utilizadas nas coberturas acessíveis de edifícios mais pesados e de garagens, requerendo uma manutenção mais regular. As coberturas intensivas requerem um suporte estrutural especial (i.e.

carregamento adicional entre 180 a 500kg/m^2 – ver Tabela 2.1). A última categoria são as coberturas semi-intensivas e possuem características mistas das extensivas e intensivas.

Tabela 2.1: Classificação de coberturas verdes de acordo com o tipo de uso, construção e requisitos de manutenção (Raji et al., 2015).

	Cobertura verde extensiva	**Cobertura verde semi-intensiva**	**Cobertura verde intensiva**
Manutenção	Baixa	Periódica	Alta
Irrigação	Não	Periódica	Regular
Comunidade de plantas	Musgo, *sedum*, ervas e relva	Relvas, ervas e arbustos	Relvas ou plantas perenes, arbustos e árvores
Altura do sistema construtivo	60 - 200mm	120 - 250mm	150 - 400mm, em garagens subterrâneas > 1000 mm
Peso	60 - 150kg/m^2	120 - 200kg/m^2	180 - 500kg/m^2
Utilização	Camada de proteção ecológica	Cobertura verde projetada	Jardim tipo parque

Todas as coberturas são constituídas por diversas camadas, tendo cada uma delas a sua função: a membrana de impermeabilização, a tela anti-raiz, a camada de drenagem e geotêxtil, a camada de solo, a cobertura vegetal e o sistema de rega. A membrana de impermeabilização confere proteção à laje enquanto a tela anti-raiz tem como função proteger a camada anterior da penetração de raízes. A camada de drenagem e o geotêxtil permitem recriar o ambiente natural de crescimento da vegetação, por drenarem o excesso de água retida no solo, armazenando-a para as plantas nos períodos de seca e evitando o arrastamento de partículas do solo. Acima do geotêxtil é colocado o solo, geralmente com baixa massa volúmica (i.e. 800-900kg/m^3), que é enriquecido com alguns minerais (Lazzarin et al., 2005). A espessura do solo varia consoante o tipo de cobertura e geralmente entre os 6cm e os 40cm. O tipo de vegetação pode ir desde as espécies mais comuns de relva e ervas utilizados nas coberturas extensivas e arbustos e árvores que necessitem de manutenção regular para as coberturas intensivas.

2.2.2 Vantagens/Desvantagens e funcionalidade

As coberturas verdes trazem várias vantagens ao nível da cobertura e do edifício e, também, ao meio urbano.

Devido à grande quantidade de construção de novas infraestruturas, a área de espaços verdes nas cidades tem vindo a diminuir, representando as coberturas cerca de 32% das áreas construídas nas cidades. As coberturas verdes ajudam a evitar o efeito de ilha nas zonas de maior densidade populacional e áreas de edifícios, nas quais as temperaturas ambiente são mais elevadas, pois ajudam a que se proporcionem os processos de evapotranspiração das plantas, absorvendo os poluentes atmosféricos (Sfakianaki et al., 2009).

A evapotranspiração é a combinação de dois processos simultâneos: a perda de água do solo, por evaporação, e a perda de água da planta, por transpiração (Allen et al., 1998). A evaporação de um solo cultivado é maioritariamente determinada pela fração de radiação solar que atinge o solo, isto é, quanto mais pequena a planta maior a perda de água do solo por evaporação, pois maior a área de solo exposta à radiação solar, e quanto maior a planta maior a perda de água por transpiração da mesma, pois a área de solo exposta diminui (Allen et al., 1998). A evapotranspiração é expressa em milímetros por unidade de tempo (e.g. hora, dia, década, mês, ano ou um ciclo inteiro de cultura). No mesmo artigo, os autores descreveram o ritmo de evapotranspiração de uma superfície de referência, que não tenha falta de água, como a evapotranspiração de referência da colheita ou evapotranspiração de referência e esta é identificado por ET_0.

As coberturas arrefecem os edifícios, capturam e filtram as águas da chuva, contudo isto depende da espessura do solo, do tipo de vegetação e da duração e intensidade da precipitação (Henry e Frascaria-Lacoste, 2012). Além disso, proporcionam *habitat* à vida selvagem, reduzem o efeito de estufa das cidades, proporcionam estética à paisagem, uma experiência recreativa e por vezes comida, para os habitantes das cidades (Oberndorfer et al., 2007).

Atualmente, as coberturas verdes surgem como uma solução para a redução da emissão de gases com efeito de estufa e adaptação às mudanças climáticas pois permitem a transformação do espaço da cobertura em espaços verdes, alterando o uso da área de implementação dos edifícios sem comprometer o desenvolvimento urbano (Stater, 2008).

Há que referir o conforto térmico e o menor consumo energético aliados às vantagens ao nível da cobertura, ou seja, a maior inércia térmica, redução da absorção solar na cobertura e a redução de ruído (Fioretti et al., 2010).

A zona verde protege a cobertura do edifício da exposição solar através do efeito sombra e, em conjunto com a evapotranspiração das plantas, gera um arrefecimento do solo. Deste modo, as plantas absorvem e dissipam uma grande quantidade de calor, reduzindo a carga térmica através do solo, o que diminui o fluxo de calor que vai para o interior do edifício. Como consequência, as necessidades energéticas de arrefecimento/aquecimento e as flutuações de temperatura durante o dia reduzem-se (Niachou et al., 2001; Santamouris, et al., 2007; Fioretti et al., 2010). Consequentemente é diminuída a necessidade de sistemas de climatização, o que reduz o consumo de energia. Este

consumo é influenciado principalmente pelas propriedades térmicas do solo (i.e. condutibilidade térmica e capacidade de aquecimento) e pela sua espessura, pelas características das plantas (i.e. índice de área das folhas, orientação e forma das folhas), pelo tipo de utilização do edifício e pelas condições meteorológicas (Berndtsson et al., 2009; Schweitzer e Erell, 2014).

Por outro lado, os elevados custos associados à instalação das coberturas verdes, à manutenção e à rega das mesmas, o acréscimo do seu peso na estrutura do edifício e o risco de infiltrações por estar permanentemente molhado, em contacto com a água (e.g. chuva, rega) são algumas das principais desvantagens deste tipo de coberturas.

2.3 Desempenho térmico de coberturas verdes

Neste capítulo serão abordados estudos desenvolvidos sobre coberturas verdes, em particular a avaliação do seu comportamento térmico. As Tabelas 2.2 a 2.4 resumem os principais estudos realizados em vários países e diferentes climas (i.e. frio, tropical e mediterrânico). Nestas estão discriminados: o tipo de investigação, local e duração; as características da cobertura verde; os parâmetros medidos; e principais conclusões.

Na Tabela 2.2, relativa a climas frios, pode observar-se que Liu, em 2004, realizou uma campanha experimental *in situ* em que conseguiu estudar o comportamento das coberturas verdes em todas as estações do ano; Liu e Minor (2005) estudaram, também *in situ*, o desempenho de uma cobertura verde nas estações de inverno e verão; Lanham (2007) através de um modelo reduzido, simulou invernos bastante rigorosos; e outros dois autores (Sailor et al., 2008; Sailor et al., 2012) fizeram simulações.

Liu (2004) comparou o desempenho de uma cobertura verde com o de uma cobertura de referência, cuja última camada era uma impermeabilização auto protegida. O desempenho das coberturas foi avaliado em quatro âmbitos: perfis de temperaturas, flutuações de temperaturas, eficiência energética e águas pluviais. Na análise dos perfis de temperatura a autora verificou que a cobertura verde pode registar temperaturas bastante inferiores às da cobertura de referência. Sabendo que em 10% dos dias de monitorização da campanha a temperatura ambiente foi superior a 30°C, a cobertura verde registou temperaturas superficiais superiores a este valor em 3% dos dias enquanto na cobertura de referência esta percentagem foi de 52% para a temperatura superficial exterior da mesma. A cobertura verde, no que respeita a eficiência energética apresentou uma redução de cerca de 95% nos ganhos de calor devido ao efeito de sombra e arrefecimento por evaporação, através da vegetação e pela massa térmica do solo. Nas perdas de calor a redução atingiu apenas um valor de 26%, chegando à conclusão que uma cobertura verde é mais eficiente em regiões mais quentes. Relativamente à chuva, Liu (2004) verificou que a cobertura verde conseguiu reduzir o volume das águas escoadas em 52% de abril a setembro de 2002.

Tabela 2.2: Quadro-resumo de estudos anteriores em coberturas verdes em climas frios.

					Características da cobertura					Parâmetros medidos					
	Ref.	**Experim.**	**Local e duração**	**Estação do Ano**	**A_{cob}**	**Isol. Térm.**	**Tipo de veget.**	**e_{solo}**	**Outros**	**Temp.**	**Rad. Solar**	**Fluxo calor**	**Precip.**	**Outros**	**Conclusões**
Clima frio	**Liu (2004)**	In situ	Em Ottawa, Canada de Nov. 2000 a Set. 2002	Todas	36m^2	Sim	Ervas (1ºano); Cobertura vegetal (2ºano)	15cm	Barreira anti-vapor; Isol. térmico; Imperm.; Repelente anti-raiz; Drenagem; Solo; Vegetação	Amb.; superf.	Sim	Sim	Sim	Humidade do solo e HR	Redução de 95% nos ganhos de calor e 26% nas perdas; Redução de 52% no volume de água escoada da precipitação
	Liu e Minor (2005)	In situ	Toronto, Canada	Inverno e verão	460m^2	Sim	Ervas	7,5cm; 10cm	Laje metálica; Placa de gesso; Barreira anti vapor; Isol. Térmico; Membrana betuminosa; Solo; Vegetação	Amb.; superf.	-	Sim	Sim	Dados da chuva	Redução do fluxo de calor em 70%-90% no verão e 10%-30% no inverno; Redução de 57% no volume de água escoada da precipitação
	Lanham (2007)	Modelo Reduzido	Ontário, Canada	Inverno	4,5m^2	Sim	Ervas	10cm; 15cm	Imperm.; Drenagem; Geotêxtil; Solo; Vegetação	Amb.	-	-	-	Quantidade de energia para manter a Temp. interior a 21°C	Modelo de referência necessitou de 11%-33% mais energia para aquecer o interior; cobertura verde apresenta resistência térmica 11% a 44% superior; em clima frios, a camada de isolamento térmico é prioritário e o substrato é secundário
	Sailor et al. (2008)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Condutibili-dade térmica, refletividade, calor específico, emissividade	Aumento da condutibilidade térmica: diminuição de relação agregado/areia; aumento da matéria orgânica; solo saturado de água.
	Sailor et al. (2012)	-	Houston; Phoenix; Portland; New York	-	1660m^2; 744m^2	Sim	-	5cm; 15cm; 30cm	Laje metálica; Isol. térmico; Vegetação	-	-	-	-	Consumo de energia, custos de energia, LAI (índice de área das folhas)	Ganhos energéticos monetários aumentam com o aumento da espessura da camada de solo e com o LAI; coberturas verdes funcionam melhor em climas frios

- Não definido, pelos autores, no artigo.

Liu e Minor (2005) estudaram duas coberturas verdes extensivas, comparando-as entre si e uma cobertura de referência revestida com uma membrana betuminosa. Foi estudado o desempenho das coberturas através dos perfis de temperatura, fluxos de calor e escoamento de água pluviais. As coberturas verdes diferem a nível de espessura e cor da vegetação. Apesar da cobertura vegetativa, durante o primeiro ano de campanha, ter sido reduzida, ambas as coberturas tiveram uma redução do fluxo de calor, pela cobertura, em 70-90% no verão e 10-30% no inverno, relativamente à cobertura de referência. A cobertura mais espessa e de cor mais clara apresentou uma melhoria de 3% a mais relativamente à outra cobertura verde, no fluxo de calor pela mesma, durante o período de verão. Relativamente ao escoamento das águas pluviais e à semelhança de Liu (2004), as coberturas verdes apresentaram uma redução média anual de 57% comparado com a cobertura de referência.

Lanham (2007) através de modelos reduzidos de coberturas verdes e um de referência, estudou a quantidade de energia necessária para manter o interior dos mesmos à temperatura de 21°C enquanto a temperatura exterior oscilava entre os 0°C e os -25°C. Foi observado que o modelo de referência necessitou de 11% a 33% mais energia para aquecer o seu interior comparado com o modelo de cobertura verde e que estes apresentaram resistência térmica 11% a 44% superior ao modelo de referência. Verificou-se que as propriedades de isolamento das coberturas verdes em climas frios são principalmente afetadas pela camada de isolamento térmico e não pelo substrato, sendo este secundário no seu efeito nas propriedades de isolamento térmico de uma cobertura verde.

Sailor et al. (2008) analisaram oito tipos de solo cujos constituintes e condições de humidade diferiam entre si. Foi verificada uma diminuição da condutibilidade térmica, aquando do aumento da relação agregado/areia e o mesmo fenómeno aquando da diminuição da quantidade de matéria orgânica; ao saturar-se o solo de água, a sua condutibilidade térmica aumenta; e a capacidade, da cobertura verde, de armazenar energia térmica, é proporcional ao calor específico do solo. Os autores concluíram que, com o aumento da quantidade de água no solo, a superfície do solo fica inicialmente saturada, correspondendo a um albedo baixo e, consequentemente, a uma grande absorção de radiação solar. Por outro lado, à medida que a camada superior do solo seca, o albedo aumenta e a quantidade de radiação solar absorvida diminui.

Sailor et al. (2012) observaram que os ganhos energéticos monetários aumentam com o aumento da espessura da camada de solo e com o aumento do índice de área da folha (LAI). Verificaram que as coberturas verdes funcionam melhor em climas frios, quando a massa térmica da cobertura aumenta, pois os edifícios necessitam de aquecimento durante a noite. Por fim, concluíram que nos edifícios em que é necessário arrefecimento, o parâmetro mais importante é o LAI pois quanto mais densa for a vegetação, menores são as necessidades de arrefecimento.

Em suma, os autores verificaram que uma vegetação com LAI elevado, um solo com elevada relação agregado/areia e uma quantidade baixa de matéria orgânica e um solo com baixo teor de humidade, são todos factores que favorecem o arrefecimento de um edifício no verão, enquanto nas estações frias a camada de isolamento térmico é o factor princiapal na manutenção da temperatura do ambiente interior colocando em segundo lugar o substrato. Da análise destes artigos pode-se concluir que as coberturas verdes são mais eficientes em climas mais quentes. Relativamente à redução do

volume de águas escoadas provenintes de precipitação, este valor ultrapassa os 50% e as reduções nos gastos energéticos apresentaram valores acima dos 10%.

Na Tabela 2.3, apresentam-se os trabalhos realizados em climas tropicais. Pode observar-se que todos os autores realizaram campanhas experimentais *in situ* e que o parâmetro de medição mais utilizado foi a temperatura.

Wong et al. (2003) chegaram à conclusão que as temperaturas superficiais do solo da cobertura verde foram significativamente inferiores às temperaturas da cobertura de referência. Isto deveu-se ao efeito de sombra provocado pela vegetação, sendo que a variação da temperatura superficial dependeu da densidade do LAI – as temperaturas mais baixas foram medidas sob as folhagens mais espessas. Estes autores demonstraram que a temperatura ambiente, um metro acima da cobertura verde, apresentou um valor 4,05°C abaixo do valor, à mesma altura, da cobertura de referência, demonstrando que as coberturas verdes podem de facto, minimizar o "efeito de ilha" nos centros urbanos. Os autores verificaram também que os benefícios térmicos das coberturas verdes são consequência do efeito combinado do solo e da vegetação, uma vez que o solo adiciona um efeito de isolamento térmico enquanto a vegetação o protege do sol.

Simmons et al. (2008) compararam o desempenho de seis coberturas verdes extensivas, com diferentes *designs*, com telhados com reduzido (pretos) e elevado (brancos) albedo. Concluíram que coberturas verdes podem afetar significativamente os perfis de temperatura arrefecendo as camadas superficiais e o ambiente interior em dias quentes. Outra das suas importantes conclusões é que as coberturas verdes podem reter quantidades significativas de chuva, dependendo da pluviometria e do *design* da cobertura, quanto maior o evento de chuva, menor é, em média, a capacidade de retenção das coberturas verdes: para um evento de chuva de 12mm surgiram valores de retenção de água entre 26% e 88%, para um evento de 28mm a retenção já foi de 8% a 43% e para 49mm foi de 13% a 44%. Os autores sugerem que as coberturas verdes passem a ser desenhadas tendo em conta o local geográfico e as necessidades do cliente (i.e. que se baseiem em objetivos de desempenho específicos por oposição a objetivos de desempenho assumidos) tendo em conta que estas podem falhar se não tiverem sido projetadas corretamente.

Feng et al. (2010) verificaram também a influência das propriedades do solo e da vegetação na temperatura. Observaram que a temperatura das folhas é influenciada pela intensidade da radiação solar, temperatura ambiente, humidade relativa, velocidade do vento e teor de humidade do solo e, é por isso, que quando o solo começa a secar, a temperatura das folhas aumenta. Os resultados experimentais demonstraram que num dia típico de verão, quando o solo estava saturado, a radiação solar foi responsável por 99,1% do ganho total de calor de uma cobertura verde enquanto os ganhos por convecção foram de 0,9%. De todo o calor dissipado, 58,4% foi pela evapotranspiração da vegetação e do solo, 30,9% por trocas radioativas e 9,5% pela fotossíntese da vegetação. Apenas 1,2% foi armazenada pelas plantas e pelo solo, ou transferidas para a divisão interior.

Tabela 2.3: Quadro-resumo de estudos anteriores em coberturas verdes em climas tropicais.

					Características da cobertura					Parâmetros medidos					
	Ref.	**Exper im.**	**Local e duração**	**Estação do Ano**	**A_{cob}**	**Isol. Térm.**	**Tipo de veget.**	**e_{solo}**	**Outros**	**Temp.**	**Rad Solar**	**Fluxo calor**	**Precip.**	**Outros**	**Conclusões**
Clima tropical	**Wong et al. (2003)**	In situ	Em Singapure de 25 Out. a 10 Nov. 2001	(clima tropical)	-	-	Coberto vegetal e arbustos	Inten-siva	-	Amb.; superf.	-	-	-	HR; velocidade do vento	Temperatura ambiente a 1m de altura é 4,05°C inferior na cobertura verde; benefícios térmicos das coberturas verdes são consequência do efeito combinado do solo e da vegetação
	Simmons et al. (2008)	In situ	Em Austin, Texas de Out. a Nov. 2006 e de Mar. a Jun 2007	Outuno e Primavera	-	Sim	Coberto vegetal	10cm	Estrutura metálica; Isol. térmico; Tela anti-raiz; Drenagem; Solo; Vegetação	Amb.; superf.; solo	-	-	Sim	Escoa-mento;	As coberturas verdes afetam os perfis de temperatura arrefecendo as camadas superficiais e o ambiente interior em dias quentes; quanto maior o evento de chuva menor é a capacidade de retenção de água
	Feng et al. (2010)	In situ	Em Guangzhou, China de 11 Jun. a 22 Jul. 2009	Verão	-	-	Sedum (7cm) LAI= 4,6	4cm	Solo arenoso seco	Amb.; solo; veget.	Sim	Sim	-	Ponto de orvalho; Vel. vento; Volume de água no solo	O calor dissipado por uma cobertura verde, 58,4% é por evapotranspiração, 30,9% por trocas radiativas e 9,5% por fotossíntese; penas 1,2% é armazenado pelas plantas e pelo solo
	Qin et al. (2012)	In situ	Em Singapure de Jun. 2012 a Jun. 2014	Todas	12m^2	-	Relva e ervas	25cm	Estrutura metálica; seixos; Malha; Filtro; Solo; Vegetação	Amb; solo	Sim	-	Sim	Escoa-mento; Velocida-de do vento; Humida-de do ar	Cobertura verde reduz a temperatura superficial exterior em 7,3°C e a ambiente interior em 0,5°C; num evento de chuva de 1mm/min a cobertura verde permite reduzir o auge do escoamento em 65% e retém 11,4%
	Dvorak e Volder (2013)	In situ	Em Texas, USA de 1 Mai. a 31 Ago. 2010	Primavera e verão (Clima subtropical húmido)	4,3m^2	Sim	Ervas	10cm	Geodreno, Solo (1cm), Folha absorvente de humidade, Solo (9cm)	Amb; superf.	-	-	-	Humida-de do solo	Mesmo sem rega, as coberturas verdes reduzem as temperaturas no solo; a temperatura na base do substrato foi 37,3°C mas baixa do que na superfície da cobertura convencional; redução da amplitude térmica de 50°C para 17°C entre cobertura verde e convencional
	Yang et al. (2015)	In situ	Em Guangzhou, China de 14 Ago. a 15 Out. 2013	(Clima subtropical)	-	Sim	Sedum	10cm; 20cm	Laje de BA; Camada de nivelamento; Imperm.; Isol. térmico; Argamassa; Tijolo de cimento; Solo; Vegetação	Amb.; superf.; solo	Sim	Sim	-	HR; velocida-de do vento; consumo de energia de AC;	Temperatura ambiente interior é 0,9-1,0°C mais baixa numa cobertura verde do que numa cobertura exposta e a temperatura superficial interior é 3,6-4,0°C; uma espessura maior traduz-se em maior capacidade de armazenamento de calor mas não num ganho energético interior significante.

- Não definido, pelos autores, no artigo.

Qin et al. (2012) avaliaram três tabuleiros com 4m^2 de área cada um, sendo dois deles coberturas verdes e outro de referência revestido a tijoleira, onde avaliaram o comportamento térmico e o escoamento pluvial. Estes autores concluíram que a cobertura verde pode reduzir a temperatura superficial exterior em 7,3°C e a ambiente interior em 0,5°C quando comparada com uma cobertura tradicional, durante o período compreendido entre as 10h00m e as 16h00m. Também estudaram um evento de chuva, com uma intensidade máxima de 1mm/min, concluindo que a cobertura verde permitiu reduzir o auge do escoamento em 65% e retendo o restante em 11,4%.

Dvorak e Volder (2013) utilizaram 12 módulos de 60cm por 60cm representativos de coberturas verdes. Observaram que estas, mesmo sem rega, reduzem significativamente as temperaturas no solo, aumentando assim o tempo de vida das membranas de impermeabilização. Analisaram, também, a influência do solo e da vegetação, na medida em que estes autores verificaram uma redução de 50°C para 17°C na amplitude térmica registada, respetivamente, na superfície convencional e na base do substrato da cobertura verde, registada na membrana de impermeabilização.

Yang et al. (2015) compararam duas coberturas verdes (uma com 10cm e outra com 20cm) a três coberturas já existentes das quais uma exposta, uma com telhado em cerâmica e outra com telhado em barro. Concluíram que as temperaturas interiores foram 0,9-1,0°C mais baixas nas coberturas verdes do que na cobertura exposta, e o mesmo verificou-se nas temperaturas superficiais interiores com uma redução de 3,6-4,0°C. Ao comparar-se as duas coberturas verdes, conclui-se que uma maior espessura se traduz numa maior capacidade de armazenamento de calor contudo o ganho energético interior não é significante.

As principais conclusões destes estudos foram de encontro às dos estudos realizados em climas frios: as características do solo e o tipo de vegetação têm bastante influência no desempenho das coberturas verdes. Associada a esta influência, e por estarem localizadas em zonas com um elevado nível de humidade relativa, pode concluir-se, através da análise destes artigos, que as coberturas verdes são eficientes mesmo sem uma rega constante e, também, nos dias sem precipitação. Foi verificado que as coberturas conseguem diminuir o efeito de ilha de calor nos centros urbanos e que conseguem diminuir as flutuações térmicas na cobertura. Em eventos de chuva, foi verificado que quanto maior o evento menor é a capacidade de retenção de água, contudo, para eventos pequenos a capacidade de retenção de água chega a ser superior a 50%, como verificado para os climas frios.

Na Tabela 2.4, relativa aos estudos em clima mediterrânico, observa-se que todos os autores, com exceção de um que realizou a campanha num modelo reduzido, realizaram campanhas experimentais *in situ*. Grande parte das campanhas experimentais foram realizadas no verão e os parâmetros mais medidos foram as temperaturas ambiente, superficiais e ao longo do solo bem como os fluxos de calor. Apenas Schweitzer & Erell (2014), utilizaram um modelo reduzido, com o intuito de perceber a importância das características da vegetação.

Tabela 2.4: Quadro-resumo de estudos anteriores em coberturas verdes em climas mediterrânicos.

					Características da cobertura					Parâmetros medidos					
	Ref.	**Experim.**	**Local e duração**	**Estação do Ano**	**A_{cob}**	**Isol. Térm.**	**Tipo de veget.**	**e_{solo}**	**Outros**	**Temp.**	**Rad Solar**	**Fluxo calor**	**Precip.**	**Outros**	**Conclusões**
Clima mediterrânico	**Niachou et al. (2001)**	In situ	Em Loutraki, Greece de 30 Jun. a 17 Ago. 2000	Verão	-	Sim	-	-	-	Amb.; superf.; solo	-	Sim	-	HR; Condições de conforto térmico	Numa cobertura sem isol. térmico, o fluxo de calor é 6-16W/m2°C mais elevado numa cobertura tradicional; os ganhos energéticos, em coberturas com isol. térmico foi de 2% e em coberturas sem isol. térmico foi de 37-48%
	Lazzarin et al. (2005)	In situ	Em S. Bartolo Hospital, Vicenza, Itália em 2002/3/4	Verão e inverno	1000m^2	Sim	-	20cm	Laje BA; Imperm.; Isol. térmico; Drenagem; Solo; Vegetação	Amb; superf.; solo	Sim	-	Acumu-lada	Humidade do solo	Uma cobertura verde com o solo seco, no verão, atenua a entrada dos fluxos de calor em cerca de 60%; com o solo húmido, a entrada de fluxo é cancelada e este sai da cobertura, servindo esta para arrefecer o solo.
	Sfakianaki et al. (2009)	In situ	Em Athens, Greece em Mar. e Mai. 2007	Primave-ra	100m^2	Sim	Ervas, Arbustos e Árvores	-	Isol. térmico; Imperm.; Tela anti-raiz; Barreira anti-vapor; Drenagem; Geotêxtil; Solo; Vegetação	Amb.; superf.	Sim	-	-	-	As coberturas verdes contribuíram com 2% a 5% para as cargas térmicas dos edifícios com isol. térmico; reduzem a temperatura ambiente interior em 0,3°C em dias quentes de inverno e aumentam em 0,4°C em dias frios e enublados; redução as necessidades de refrigeração de edifícios isolados em 11%
	Schweitzer & Erell (2014)	Modelo Reduzido	EM Tel Aviv, Israel de Mai. 2008 a Set. 2009	Todas	1m^2	Sim	4 tipos	5cm	Isol. Térmico; Solo; Vegetação	Amb.; superf.	-	-	Sim	Variáveis meteo.; Consumo de água	O efeito de sombra das plantas é o principal fator na diminuição da temperatura ambiente interior, no verão;
	Bevilacqua et al. (2015)	In situ	Em Lleida, Spain de 2010 a 2012	Todas (clima seco)	2000m^2	Sim	Mistura de Sedum	Exten sivo	Geotextil; Imperm.; Membrana; drenante; Geotextil; Isolamento; Cimento poroso; Substrato; Vegetação	Amb.; superfic ial; solo	-	-	Média anual e mensal	Variáveis meteo.; HR; Horas de luz; Cobertura vegetal e composição florística	Apesar de a vegetação aumentar 70% não implicou uma melhoria da capacidade energética; 8cm de profundidade do substrato é o suficiente para estabilizar a temperatura da base da camada

- Não definido, pelos autores, no artigo.

Niachou et al. (2001) concluíram que a temperatura da superfície do solo depende do tipo de vegetação presente. Realizaram a medição de temperaturas superficiais em zonas com diferentes densidades de vegetação e obtiveram como resultado que as menores temperaturas superficiais registadas foram medidas por baixo da vegetação mais densa, obtendo menores temperaturas superficiais que as registadas em coberturas tradicionais. Ao compararem as temperaturas ambientes interiores de edifícios com isolamento térmico com edifícios com coberturas verdes, a temperatura mais baixa, registada, durante um dia tipo de verão, foi medida no edifício com cobertura verde e não excedeu os 30°C. Os autores verificaram que numa cobertura sem isolamento térmico, o fluxo de calor é 6-16W/m^2°C mais elevado numa cobertura tradicional comparada com uma cobertura verde. Enquanto numa cobertura com isolamento térmico, esta diferença foi de apenas 0,02-0,06W/m^2°C. Finalmente, observaram que o impacto da cobertura verde nos ganhos energéticos, em coberturas com isolamento térmico, foi de 2%, enquanto que numa cobertura sem isolamento térmico, o impacto da cobertura verde nos ganhos energéticos foi de 37-48%.

Lazzarin et al. (2005) comprovaram, através de modelos teóricos, a importância da evapotranspiração. Assim, verificaram que a cobertura verde, durante o verão numa situação de solo seco, atenuou a entrada dos fluxos de calor em cerca de 60% quando comparada com as coberturas tradicionais. Inversamente, numa situação em que o solo está húmido, verificaram que a entrada de fluxo tinha sido cancelada e que o fluxo de calor saía da cobertura, servindo esta para arrefecer o solo, de forma passiva, através de processos de evapotranspiração.

Sfakianaki et al. (2009) verificaram, através de modelos teóricos, que as coberturas verdes contribuíram, de forma limitada, para as cargas térmicas dos edifícios com isolamento térmico, apresentando uma melhoria de 2% a 5%. As principais conclusões a que chegaram são que as plantas atuaram como um isolamento adicional, reduzindo, desta forma, as perdas de calor através da cobertura, quer no verão quer no inverno. Verificaram que a presença de água na cobertura, e o consequente aumento da humidade no solo, aumentou a condutibilidade térmica dos constituintes do solo e as perdas de calor. Observaram que as coberturas verdes reduzem a temperatura ambiente interior em 0,3°C em dias quentes de inverno e aumentam a mesma em 0,4°C em dias frios e enublados. Contudo, as coberturas verdes contribuem para a redução de 11% das necessidades de refrigeração de edifícios isolados.

Schweitzer e Erell (2014) investigaram a importância das características da vegetação escolhida para a cobertura verde. No seu estudo, identificaram três aspetos fundamentais: o efeito de sombra, a importância das plantas e a influência do vento, no consumo de água da vegetação. Numa cobertura extensiva, o principal motivo pelo qual a temperatura ambiente interior diminui, no verão, durante as horas mais quentes, é o efeito de sombra das plantas, pois a radiação solar que atinge o solo é diminuída. Ao comparar uma cobertura extensiva com uma cobertura com um solo saturado de água, na estação quente, os autores verificaram que esta última não possui um mecanismo de arrefecimento tão eficaz por não existir sombra provocada pelas plantas. Finalmente, nos períodos de grande seca, em que a rega é necessária, concluem que é importante que existam outras formas de hidratar o solo.

Bevilacqua et al. (2015) estudaram, ao longo de dois anos, o efeito da vegetação e da sua composição no comportamento térmico de coberturas verdes extensivas. Concluíram que a vegetação é mais densa nas estações da primavera e no verão e mais rara no inverno sendo que o *sedum* foi a espécie vegetativa que variou menos (i.e. de 20 a 40%). Apesar de a vegetação aumentar 70%, de 2010 para 2012, não implicou uma melhoria da capacidade energética, pois caso não seja garantida a humidade do substrato é comprometido o efeito de arrefecimento proveniente da evapotranspiração. Outra conclusão derivada deste estudo foi que 8cm de profundidade do substrato é o suficiente para estabilizar a temperatura da base da camada funcionando como uma camada de isolamento eficiente. A radiação solar é o fator-chave que influência diretamente as temperaturas do substrato e a composição vegetativa.

As principais conclusões dos autores estiveram relacionadas com a importância do efeito de sombreamento da vegetação no solo e o teor de humidade do mesmo, uma vez que estes fatores ajudam as coberturas verdes a arrefecer os edifícios, de forma passiva, durante o verão. Foram verificadas, segundo estes artigos, reduções nos fluxos de calor através das coberturas verdes com valores acima dos 50%, chegando a ser nulas, quando o solo se apresentava húmido. À semelhança dos climas tropicais, as necessidades de refrigeração reduziram em valores superiores a 10%. Também foi verificado, através da análise efetuada, que 8cm de substrato é o suficiente para estabilizar a temperatura na base da camada da cobertura.

3. Caso de Estudo

O objeto deste estudo são os tabuleiros, localizados no Instituto Superior de Agronomia (ISA), utilizados, também, pelo projeto NativeScapeGR, em que "*através do uso de espécies autóctones em coberturas ajardinadas espera otimizar-se o uso da água e a sustentabilidade, em condições mediterrânicas, sem comprometer o valor estético e fomentar desta forma a biodiversidade"* (Fundação para a Ciência e a Tecnologia, 2015). O projeto supra está a ser executado na cobertura do Herbário João de Carvalho e Vasconcelos com recurso a um total de doze tabuleiros.

Para a situação experimental apresentada neste documento, a campanha foi realizada no mesmo local, durante o período de verão, em concreto, de 16 a 30 de junho. Será descrito seguidamente o local onde foi realizada a campanha, bem como as características que lhe são inerentes e a envolvente térmica dos tabuleiros e do respetivo substrato e vegetação de cada um. No ponto 3.2 será apresentado o procedimento experimental, as grandezas físicas medidas e todo o equipamento necessário à monitorização da campanha.

Como referido anteriormente, para esta situação experimental pretende-se comparar o comportamento térmico dos dois tipos de solos bem como o das zonas com e sem isolamento, é também pertinente analisar a influência de diferentes espécies de vegetação e identificar outros parâmetros que possam influenciar o comportamento térmico de coberturas verdes e, por último, perceber o comportamento térmico de um tabuleiro experimental numa situação desfavorável para a estação em estudo.

3.1 Amostra

3.1.1 Localização

O Herbário João de Carvalho e Vasconcelos é uma unidade destinada a estudos científicos pertencente ao ISA. O ISA encontra-se delimitado pela calçada da Tapada a sul, pela Pedreira do Alvito a Este, pela Faculdade de Medicina Veterinária e pela Faculdade de Arquitetura da Universidade de Lisboa, bem como pelo Palácio da Ajuda a Oeste e pelo Parque Florestal de Monsanto a Norte, como se observa na Figura 3.1.

Figura 3.1: Implantação do ISA com Bairro de Alvito (Este), Cç da Tapada (Sul), Palácio da Ajuda (Oeste) e o Parque Florestal do Monsanto (Norte) (ISA, 2015).

3.1.2 Caracterização dos tabuleiros

A campanha foi efetuada em quatro tabuleiros metálicos, de um total de doze, com 2,5m de comprimento, 1m de largura, 20cm de altura e espessura constante de 1,5mm. Os tabuleiros estão apoiados numa estrutura metálica que os eleva a cerca de 0,8m de altura da cobertura do edifício.

Cada tabuleiro inicialmente continha 15cm de altura de solo, mas com a compactação natural, na data da campanha, apenas existiam 13cm de altura de solo. Este está assente num sistema de drenagem que, com o suporte resistente (i.e. chapa do tabuleiro), representam uma espessura total de 2cm.

Todos os tabuleiros foram isolados, nas suas laterais (i.e. desde a altura do tabuleiro até ao chão) e parte inferior, de forma a criar compartimentos (i.e. entre o tabuleiro e a cobertura do edifício), garantindo assim que as trocas de calor apenas ocorram pelos tabuleiros. Desta forma, foram colocadas placas de poliestireno extrudido com 10cm de espessura, como visível na Figura 3.2(a), prensadas com cintas e por métodos de travamento (ver imagem (b) da mesma figura) para maximizar a estanqueidade do ambiente interior.

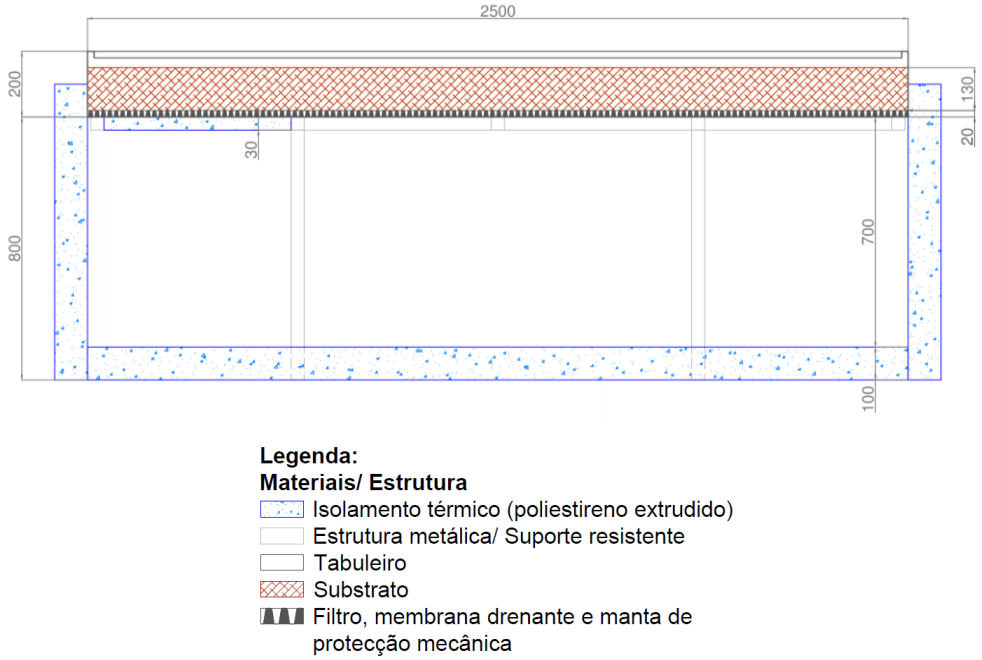
(a) **(b)** **(c)**

Figura 3.2: Pormenor do isolamento: (a) envolvente: lateral e chão da cobertura; (b) cintas e travamento; (c) zona com (1) e sem (2) isolamento no tabuleiro.

O interior do compartimento tem uma dimensão aproximada de 1m de largura, 2,5m de comprimento e 70cm de altura, isto deve-se aos 10cm de espessura da placa de isolamento assente no chão. Foi colocada uma placa de poliestireno extrudido de 3cm numa zona do tabuleiro (Figura 3.2(c)) para haver distinção entre uma zona com isolamento (1) e outra zona sem isolamento (2) e assim ser possível avaliar a influência do isolamento térmico no comportamento térmico da cobertura verde.

A Figura 3.3 esquematiza as coberturas verdes em estudo.

(a)



(b)

Figura 3.3: Compartimentos com tabuleiros de coberturas verdes: (a) planta; (b) corte AA' (Dimensão em [mm]).

Cada tabuleiro, como já referido, por cima do suporte resistente (i.e. chapa de 1,5mm) tem um sistema de drenagem composto por uma manta de proteção mecânica (i.e. geotêxtil), seguido de uma membrana drenante (i.e. Floradrain FD 25-E) e de um filtro (i.e. geotêxtil). Na Figura 3.4 estão apresentados, em detalhe, todos estes componentes juntamente com o substrato de um tabuleiro-tipo:

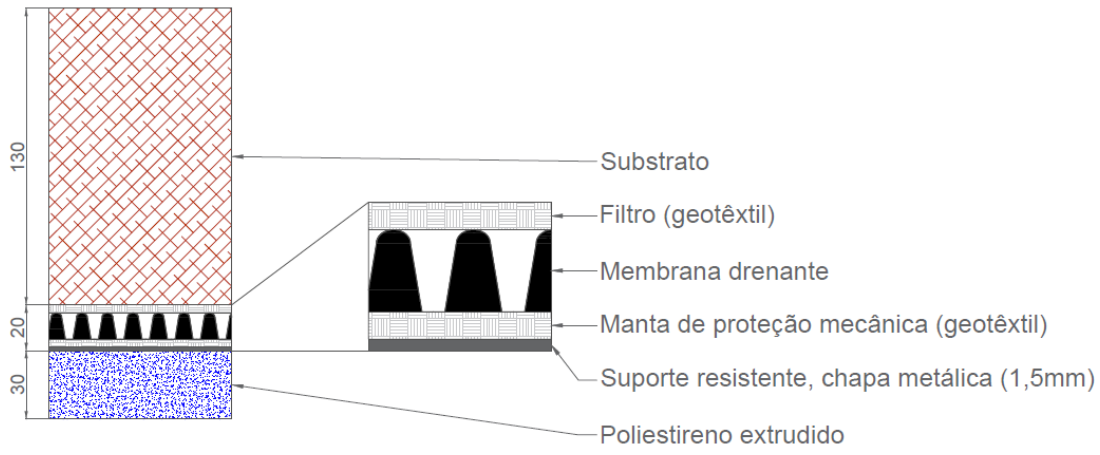


Figura 3.4: Detalhe do perfil das camadas dos tabuleiros, em milímetros.

Após descrita a parte estrutural dos tabuleiros será agora apresentada a composição dos substratos e as várias vegetações existentes e, no final, será apresentada uma tabela-resumo referente à composição de cada tabuleiro[1].

3.1.2.1 Caracterização dos substratos

Nos tabuleiros foram usados dois substratos diferentes cuja composição e características foram facultadas pelos intervenientes do projeto NativeScapeGR (Fundação para a Ciência e a Tecnologia, 2015). Sendo estes constituídos por areia, limo e argila, onde o denominado S1 contém 80,6%, 3,2% e 9,4%, respetivamente, enquanto o substrato S2 contém 88,8%, 5,6% e 3,5%. Na Tabela 3.1 estão expostas as percentagens destes componentes e também a percentagem de matéria orgânica (MO), e as concentrações de azoto (N), óxido de potássio (K_2O) e pentóxido de fósforo (P_4O_{10}). Na tabela seguinte, Tabela 3.2, estão apresentadas algumas características dos substratos (e.g. a textura, o pH, a massa volúmica aparente (Mva) e condutividade hidráulica saturada (Ksat)).

Tabela 3.1: Composição dos substratos.

Substrato	Areia (%)	Limo (%)	Argila (%)	MO (%)	N (g/kg)	K_2O (mg/kg)	P_4O_{10} (mg/kg)
S1	80,6	3,2	9,4	73	6	600	184
S2	88,8	5,6	3,5	7	1	218	126

Tabela 3.2: Características dos substratos.

Substrato	Textura	pH	Mva (g/cm^3)	Ksat (cm/dia)
S1	-[2]	5.15	0,383	5214
S2	Arenosa	7.38	0,883	3675

[1] Nesta avaliação experimental apenas foram monitorizados 4 tabuleiros pelo que os substratos e plantas enunciadas apenas são as encontradas nos mesmos.

[2] Este substrato não se classificou por ser material essencialmente orgânico.

De acordo com Silveira de Borba (2012), a textura e a estrutura de um solo constituem duas propriedades com um profundo efeito no seu comportamento (e.g. a capacidade de reter água, disponibilizar oxigénio, fornecer e reter nutrientes).

A textura de um solo é definida como a proporção relativa de argila, limo ou areia existentes nesse solo (Silveira de Borba, 2012). Os solos com textura mais fina são designados por solos argilosos, enquanto os solos com textura mais grossa são designados por arenosos. Contudo, um solo constituído por uma mistura relativamente uniforme de areia, limo e argila e que exiba as propriedades de cada material em separado, chama-se franco. Existem vários tipos de solos francos, conforme a proporção do material dominante (franco-argilosos, franco-limosos ou franco-arenosos).

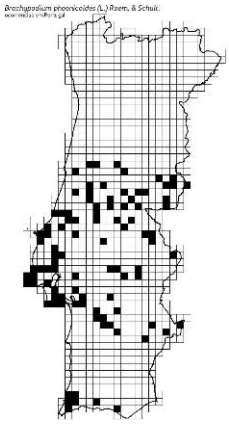
As partículas de argila constituem um importante componente do solo. A área superficial de uma dada massa de argila representa mais de mil vezes a área superficial da mesma massa de partículas de areia (Silveira de Borba, 2012). O aumento da área superficial tem implicações importantes no maneio nutritivo, porque providencia mais locais para as partículas de solo poderem reter e fornecer nutrientes (e.g. cálcio, o potássio, o magnésio e o fósforo) e água às plantas.

3.1.2.2 Caracterização da vegetação

Do projeto a decorrer no ISA, os tabuleiros escolhidos, continham diferentes plantas, mais precisamente 3 espécies combinadas entre elas e/ou com musgo. As espécies disponíveis são o braquipódio (*Brachypodium Phoenicoides*), o alecrim (*Rosmanirus Officinalis*) e o rosmaninho (*Lavandula Luisieri*). O musgo utilizado tem o nome científico *Pleurochaete*.

O *Brachypodium Phoenicoides*, conhecido por braquipódio ou braquipódio-avermelhado é uma espécie de planta com flor, pertencente à família *Poaceae*. A floração dá-se de maio a agosto e é uma planta com uma distribuição na região mediterrânica, estando, em Portugal, situada essencialmente na zona centro (Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2015) como se observa na Figura 3.5(b). Pode chegar a atingir 1m de altura. A folha é comprida e fina, mas em grandes quantidades, o que a torna muito compacta, permitindo um efeito de sombra moderado.

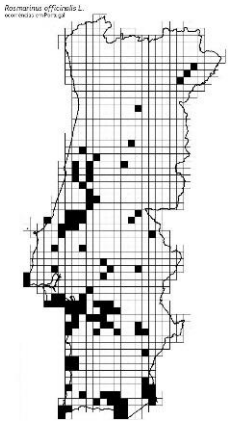
(a)



(b)

Figura 3.5: (a) *Brachypodium Phoenicoides*; (b) Mapa da distribuição da espécie em Portugal (Porto, et al., 2015).

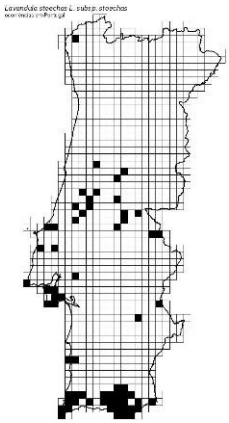
O *Rosmanirus Officinalis*, mais conhecido como alecrim, é uma espécie que pertence à família *Lamiaceae* e cuja floração se dá de janeiro a maio estando mais presente na região mediterrânica (Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2015). Em Portugal, esta espécie abunda na zona centro (litoral) e sul, mas encontra-se espalhada por todo o país como se pode ver na Figura 3.6(b). Esta planta atinge uma altura de 1,5m e é uma espécie arbustiva muito ramificada que, apesar de possuir folhas pequenas e finas, quando em pleno estado de maturação, permite um efeito de sombra moderado. As flores distribuem-se ao longo do caule.



(a) **(b)**

Figura 3.6: (a) *Rosmanirus Officinalis*; (b) Mapa da distribuição da espécie em Portugal (Porto, et al., 2015).

A *Lavandula Luisieri* é uma espécie, também chamada por rosmaninho, que pertence à mesma família do alecrim, *Lamiaceae*. A floração desta espécie ocorre de março a setembro e como as duas espécies referidas anteriormente, também se encontra na região mediterrânica (Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 2015), estando em Portugal mais presente na zona sul, junto ao mar, visto que a sua altitude de conforto está entre os 0 e os 300m. É considerado um arbusto de pequeno porte (i.e. 20 a 40cm) com um efeito de sombra elevado, composto por folhas estreitas e flores agrupadas numa espiga compacta. Na Figura 3.7(b) está apresentada a sua distribuição a nível nacional.



(a) **(b)**

Figura 3.7: (a) *Lavandula Luisieri*; (b) Mapa da distribuição da espécie em Portugal (Carapeto, et al., 2015).

O *Pleurochaete* é uma espécie de musgo, pertencente à família *Pottiaceae*, que não precisa de sombra para a sua sobrevivência (i.e. resiste à radiação solar direta). As folhas são estreitas e finas, com tamanhos entre os 4,5 e os 5,5mm de comprimento, chegando a planta a atingir entre os 2 a 6cm de altura (O'Reilly, 2010). Na Figura 3.8 está ilustrado o musgo em pormenor. O facto de ser um musgo e se alastrar na horizontal permite um efeito de sombra elevado, se este estiver hidratado.

Figura 3.8: *Pleurochaete*.

Apresenta-se de seguida uma tabela com o resumo das características de cada espécie vegetal (Tabela 3.3).

Tabela 3.3: Quadro-resumo das características da vegetação.

Espécie	Família	Floração	Região	Zona PT	Altura	Folhagem	Efeito de sombra
Braquipódio	*Poaceae*	Maio-agosto	Mediterrânico	Centro	1m	Folhas compridas, finas e em grandes quantidades	Moderado
Alecrim	*Lamiaceae*	Janeiro-maio	Mediterrânico	Centro (litoral) e Sul	1,5m	Folhas pequenas e compridas	Moderado
Rosmaninho	*Lamiaceae*	Março a setembro	Mediterrânico	Sul	20 a 40cm	Folhas estreitas	Elevado
Pleurochaete	*Pottiaceae*	-	-	-	2 a 6cm	Folhas estreitas e finas	Elevado (quando hidratado)

3.1.2.3 Composição de cada tabuleiro

Para cada tabuleiro analisado neste trabalho escolheu-se um substrato e uma ou mais espécies de plantas para fazer as mais diversas combinações.

Optou-se por escolher o tabuleiro T3 e T7 para se comparar os substratos visto que a vegetação é a mesma. Os tabuleiros T5 e T6 foram escolhidos com o intuito de comparar vegetação de alturas diferentes e efeitos de sombra diferentes. Neste caso o tabuleiro T6 contém uma vegetação com maior altura que o tabuleiro T7 e o tabuleiro T5 contém todas as espécies referidas incluindo o musgo fazendo com que se possa supor que o seu efeito de sombra e retenção de água seja mais elevado.

Para uma melhor leitura, estes dados são apresentados na Tabela 3.4 apresentada de seguida:

Tabela 3.4: Quadro-resumo dos substratos e vegetação de cada tabuleiro.

Tabuleiro	Substrato	Vegetação		
		Nome comum	Nome científico	Altura (cm)
T3	S2	Braquipódio	*Brachypodium Phoenicoides*	20-25
T5	S1	Rosmaninho	*Lavandula Luisieri*	50-60
		Alecrim	*Rosmanirus Officinalis*	30-50
		Braquipódio	*Brachypodium Phoenicoides*	20-25
		Musgo	*Pleurochaete*	1-2
T6	S1	Alecrim	*Rosmanirus Officinalis*	30-60
T7	S1	Braquipódio	*Brachypodium Phoenicoides*	20-25

Na Figura 3.9 estão quatro fotografias, uma de cada tabuleiro, onde se pode observar a densidade e composição da vegetação de cada um.

(a) **(b)** **(c)** **(d)**

Figura 3.9: Fotografia de cada tabuleiro: (a)Tabuleiro T3; (b)Tabuleiro T5; (c)Tabuleiro T6; (d)Tabuleiro T7.

3.1.2.4 Rega

Todos os tabuleiros estavam sujeitos à quantidade de água diária, que corresponde a 60% ET_0 (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998) definida pelos responsáveis do projeto NativeScapeGR (Fundação para a Ciência e a Tecnologia, 2015). A única diferença neste campo é o número de regas ao longo do dia. Nos tabuleiros com musgo, tabuleiro T5, a rega é realizada às 8h, às 10h e às 19h, através de dois sistemas (i.e. gota-a-gota e pulverização). Nos restantes tabuleiros (i.e. T3, T6 e T7), tabuleiros sem musgo, apenas havia uma rega diária às 8h realizada apenas pelo sistema de gota-a-gota.

3.2 Procedimento experimental

A campanha experimental realizou-se entre as 10h30m do dia 16 de junho e as 10h30m do dia 30 do mesmo mês.

Para a medição das grandezas físicas (e.g. temperatura, humidade) o equipamento utilizado durante a campanha foi o seguinte:

- 38 termopares do tipo T – que utilizam uma liga de constantan formada por 55% de cobre e 45% de níquel: com 0,2mm de espessura, revestidos por um isolamento elétrico e soldados por descarga elétrica pelo Departamento de Engenharia Civil (Gomes, 2010), com erros estimados de +/-0.2°C para 100°C e +/- 0.5°C para 400°C. Os termopares são sensores que permitem a medição de temperaturas.
- 4 fluxímetros Hukseflux HFP01: com sensor de termopilha e uma gama de medição entre -2000 a +2000W/m^2 que fornecem uma leitura do fluxo de calor que passa pelo mesmo.
- 4 termohigrómetros: dois TGP-4500 (Tinytag) e dois Rotronic Hidrolog-D que permitem obter leituras da temperatura e humidade relativa do ar. Estes aparelhos contêm memória interna, bastando descarregar os dados diretamente para o computador através do respetivo cabo de ligação de cada um dos termohigrómetros.
- 1 piranómetro: com células fotoelétricas LI-COR LI-200SA, com um erro absoluto máximo estimado de 5%, sendo que o erro típico é de 3% e o erro de co-seno está compreendido entre +/-5% para ângulos de incidência de sol inferiores a 80º. Este equipamento permite a medição da radiação solar incidente, neste caso em plano horizontal.
- 2 sistemas de aquisição de dados: Delta T – DL2e Data Logger com bateria interna e o Campbell – CR10, que necessitou de uma fonte de alimentação externa constante. Para recolher os dados de ambos os *loggers* para o computador foi necessário o recurso a um adaptador VScom USB-COM-I, que converte Portas RS422/485 em portas USB. O Delta T contém 15 canais, sendo que o primeiro é de referência, deixando 14 possíveis de utilização. O Campbell contém 25 canais de termopares mais 6 gerais.

Cada tabuleiro contém dez termopares, dois fluxímetros e um termohigrómetro no seu interior como demonstrado na Figura 3.10 e na Figura 3.11.

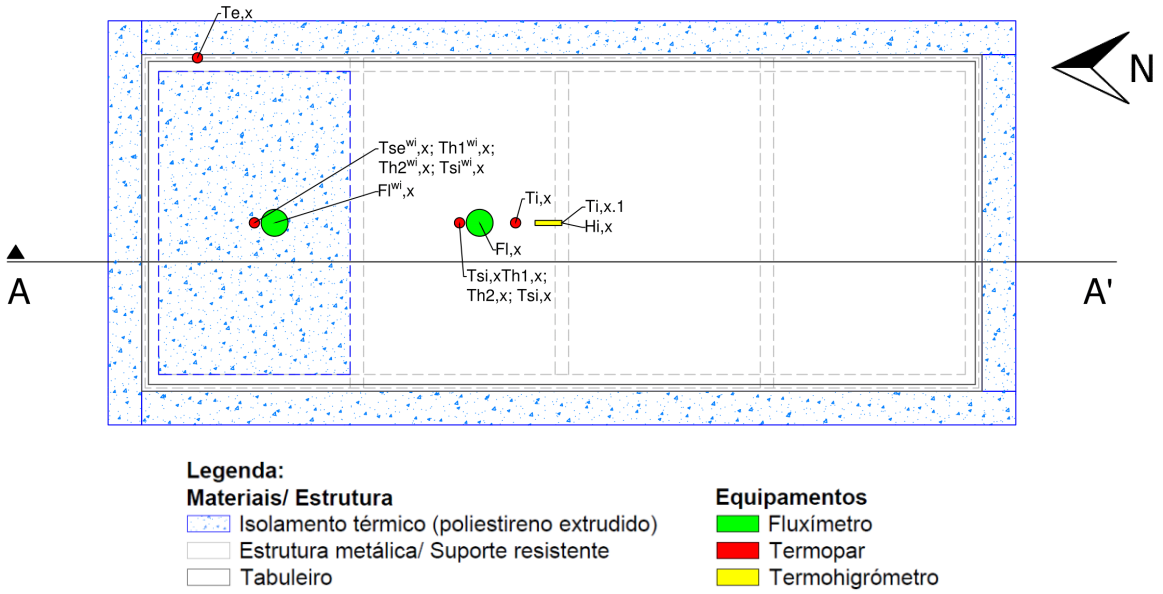


Figura 3.10: Ilustração de um tabuleiro, em planta, com a localização do equipamento.

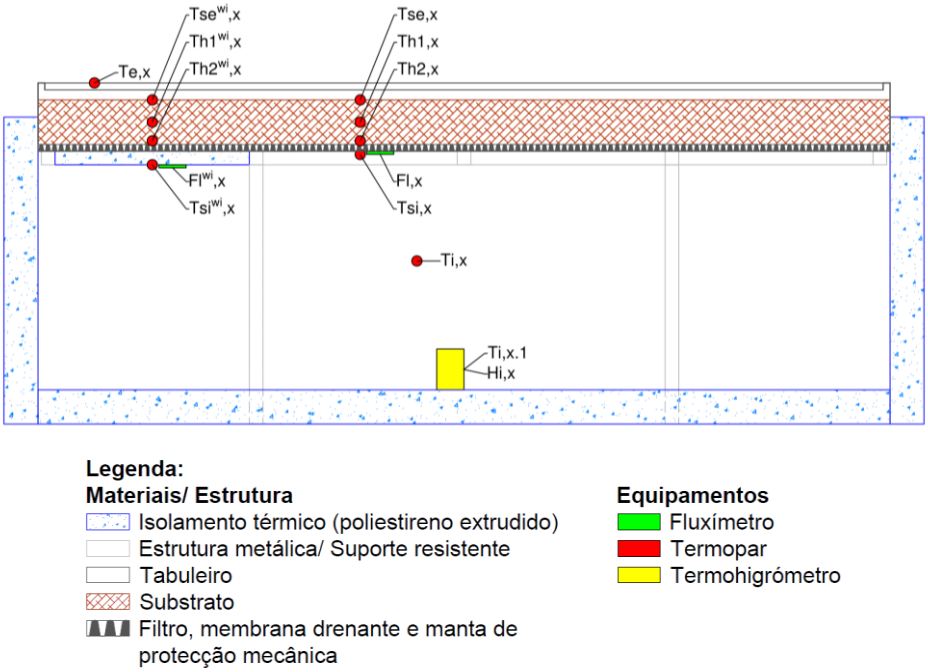


Figura 3.11: Ilustração de um tabuleiro, em perfil (corte AA'), com a localização do equipamento.

Segue de seguida uma descrição mais detalhada do equipamento aplicado nos tabuleiros.

São colocados termopares em profundidade no solo, na zona sem isolamento, mais precisamente, um na base do mesmo (Th2,*x*)[3], outro a meia altura (Th1,*x*) e outro à superfície do solo (Tse,*x*), repetindo-se o mesmo para a zona com isolamento ($Th2^{wi}$,*x*, $Th1^{wi}$,*x* e Tse^{wi},*x*). Como o solo, na data da campanha, tinha cerca de 13cm de espessura, a altura h1 corresponde a 6,5cm (Figura 3.12(a)). O piranómetro colocado para medir a radiação solar no plano horizontal, encontra-se no Tabuleiro T6, na borda do mesmo (Figura 3.12(b)).

(a) **(b)**

Figura 3.12: (a)Pormenor das diferentes profundidades dos termopares Th2, Th1 e Tse; (b)Localização da zona com e sem isolamento no tabuleiro e piranómetro.

[3] A variável *x* representa o número do tabuleiro (e.g. 3, 5, 6 ou 7).

No interior dos compartimentos, foi colocado um termopar na superfície interior da zona com isolamento (Tsi^{wi},*x*) e outro na zona sem isolamento (Tsi,*x*), e ainda um colocado de forma a medir a temperatura do ar interior (Ti,*x*). Os fluxímetros são colocados um na zona com isolamento (Fl^{wi},*x*), outro na zona sem isolamento (Fl,*x*). Estes são colados com fita-cola, ficando encostados às respetivas superfícies. (Figura 3.13).

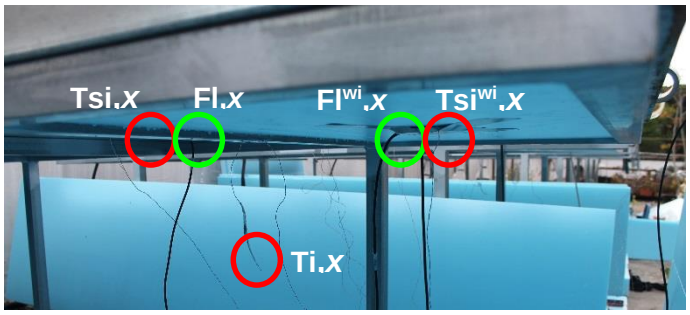
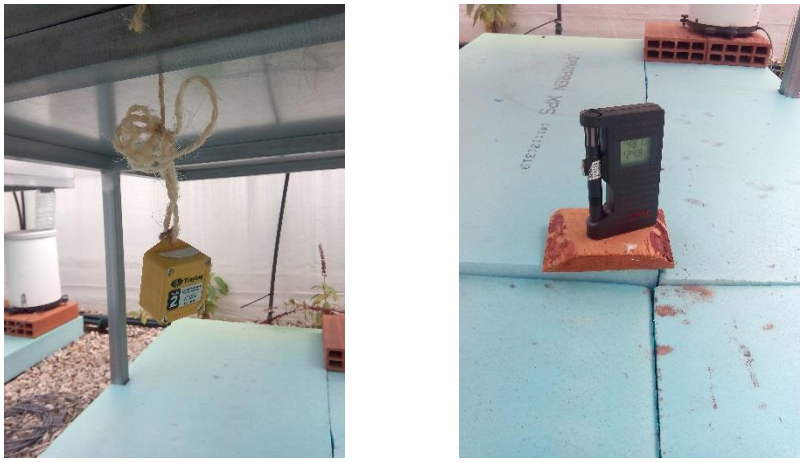


Figura 3.13: Termopares: Tsi^{wi},*x*, Tsi,*x* e Ti,*x* e fluxímetros: Fl^{wi},*x* e Fl,*x*.

Os tabuleiros contêm no seu interior um termohigrómetro que mede a temperatura interior (Ti,*x*,R ou Ti,*x*,T)[4] e a humidade relativa do ar interior (Hi,*x*) (Figura 3.14)



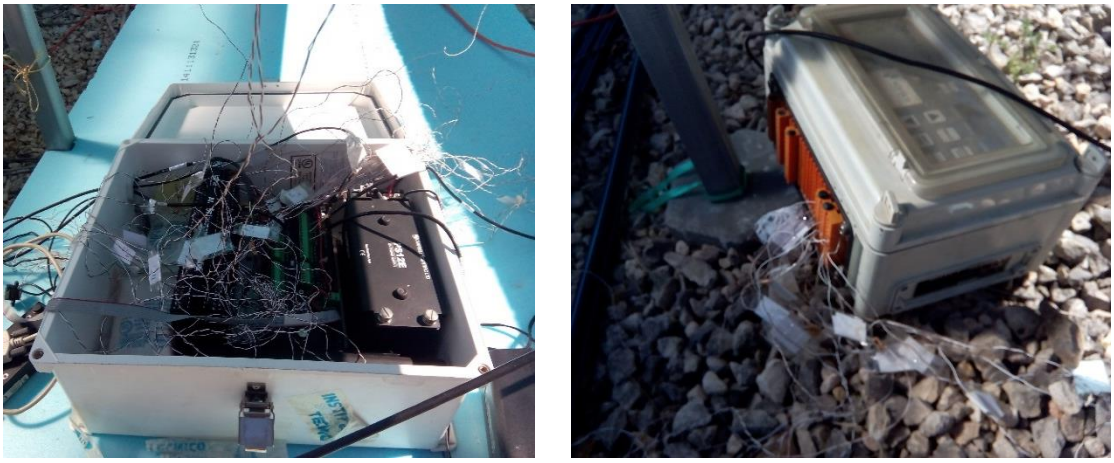
(a) **(b)**

Figura 3.14: Termohigrómetros no interior: (a)Rotronic (Ti,*x*,R); (b)Tinytag (Ti,*x*,T).

Como complemento aos tabuleiros foi colocado um termohigrómetro no exterior para medir a temperatura exterior (Te) e a humidade relativa do ar exterior (He).

[4] R-Rotronic, T-Tinytag.

Foram instalados, também, dois *data loggers* para processar e armazenar os sinais provenientes dos termopares, dos fluxímetros e do piranómetro Figura 3.15.



(a) **(b)**

Figura 3.15: *Data loggers* utilizados: (a)Campbell; (b)Delta T.

Apresenta-se, de seguida, a Tabela 3.5 e a Tabela 3.6, onde estão apresentados todos os equipamentos, instalados em cada tabuleiro, e, no caso de dependerem de um *data logger*, a qual deles cada equipamento está ligado.

Tabela 3.5: Equipamento no tabuleiro T3 e T5.

			Data logger				**Rotronic**	**Tinytag**
			Campbell			**Delta T**		
			Termopar	**Fluxímetro**	**Piranómetro**	**Termopar**		
T3	**Temperatura**	Tse,3				X		
		Th1,3				X		
		Th2,3				X		
		Tsi,3				X		
		Tse^{wi},3				X		
		$Th1^{wi}$,3				X		
		$Th2^{wi}$,3				X		
		Tsi^{wi},3				X		
		Ti,3				X		
		Ti,3,R					X	
	Humidade	Hi,3,R					X	
T5	**Temperatura**	Te,5	X					
		Tse,5	X					
		Th1,5	X					
		Th2,5	X					
		Tsi,5	X					
		Tse^{wi},5				X		
		$Th1^{wi}$,5				X		
		$Th2^{wi}$,5				X		
		Tsi^{wi},5				X		
		Ti,5	X					
	Fluxo	Fl,5		X				
		Fl^{wi},5		X				

Tabela 3.6: Equipamento no tabuleiro T6, T7 e no exterior.

			Data logger				Rotronic	Tinytag
			Campbell			Delta T		
			Termopar	Fluxímetro	Piranómetro	Termopar		
T6	Temperatura	Tse,6	X					
		Th1,6	X					
		Th2,6	X					
		Tsi,6	X					
		Tse^{wi},6	X					
		$Th1^{wi}$,6	X					
		$Th2^{wi}$,6	X					
		Tsi^{wi},6	X					
		Ti,6	X					
		Ti,6,T						X
	Humidade	Hi,6,T						X
T7	Temperatura	Te,7	X					
		Tse,7	X					
		Th1,7	X					
		Th2,7	X					
		Tsi,7	X					
		Tse^{wi},7	X					
		$Th1^{wi}$,7	X					
		$Th2^{wi}$,7	X					
		Tsi^{wi},7	X					
		Ti,7	X					
		Ti,7,R					X	
	Humidade	Hi,7,R					X	
	Fluxo	Fl,7		X				
		Fl^{wi},7		X				
Exterior	Temperatura	Te,T						X
	Humidade	He,T						X
	Radiação Solar	RS			X			

4. Análise e Discussão de Resultados

Neste capítulo serão apresentados, analisados e discutidos os principais resultados obtidos ao longo da campanha de monitorização no ISA. Inicialmente são caracterizados os parâmetros relevantes da campanha de monitorização necessários para a organização dos resultados. A apresentação dos resultados ao longo da campanha de monitorização encontram-se na secção 4.2. Um estudo mais detalhado associado às especificidades do dia mais quente está descrito na secção 4.3.

4.1 Caracterização da campanha de monitorização

Foi criada uma base de dados contendo os valores recolhidos dos cerca de 51 sensores (e.g. termopares, fluxímetros, termohigrómetros e o piranómetro). Cada um destes sensores tem associado um total de 2.017 registos ao longo de 14 dias e 10 minutos perfazendo 102.867 dados. Apesar de as leituras terem sido realizadas uma vez por minuto, cada registo corresponde à média de cada 10 minutos. Para além disto, os *loggers* mediam também outros valores (e.g. voltagem da bateria do Campbell e a temperatura de referência no Delta-T), sem grande relevância para o estudo. Também foi necessário obter valores corrigidos quer dos fluxímetros quer do piranómetro, tendo cada um deles uma constante individual que permite obter o valor de leitura nas unidades pretendidas.

Primeiramente irá ser realizada uma apresentação dos dados climáticos referentes à campanha de monitorização onde será contabilizado um período de 13 dias, das 00h00m de dia 17 de junho às 23h50m de dia 29 de junho. Desta forma são considerados dias completos com valores estabilizados, não considerando os dias de montagem e desmontagem do equipamento. Seguidamente, observam-se os resultados para um dia tipo que, visto a campanha ter-se desenrolado durante o verão, foi o dia mais quente. Para se contabilizar em simultâneo o efeito da temperatura exterior e radiação solar incidente define-se como dia mais quente o dia com maior temperatura ar-sol ($T_{ar\text{-}sol}$), doravante denominado D+Q.

A temperatura ar-sol é definida como um valor de temperatura fictícia do ar exterior que, na ausência de todas as trocas de radiação, dá a mesma taxa de fluxo de calor para a superfície exterior, equivalente à combinação da temperatura exterior com a radiação solar incidente (Jones, 2011). Esta temperatura é calculada através da seguinte equação (4.1) (Silva, 2013):

$$T_{ar-sol} = Te + \frac{\alpha \times RS}{h_{se}} \ [°C] \qquad \textbf{(4.1)}$$

Onde:

Te – Temperatura ambiente exterior [°C];

α – Coeficiente de absorção;

RS – Radiação solar incidente [W/m^2];

h_{se} – Coeficiente de transferência de calor da superfície exterior [W/m^2°C].

Segundo o Dec. Lei nº 80/2013 de 28 de novembro, o coeficiente de transferência de calor da superfície exterior é o inverso da sua resistência térmica cujo valor é 0,04m^2°C/W.

O coeficiente de absorção solar, também denominado por absortância, é definido como a razão entre a quantidade de energia radiante absorvida e o total incidente. Pelo princípio da conservação de energia, o coeficiente de absorção somado ao coeficiente de reflexão e ao coeficiente de transmissão é igual à unidade (Silva, 2013). Por os elementos serem opacos, o coeficiente de transmissão solar é adotado é igual a zero. Com isto, obtemos o coeficiente de absorção solar pela seguinte expressão (4.2):

$$1 = \alpha + \rho + \tau \iff \alpha = 1 - \rho \qquad \textbf{(4.2)}$$

Onde:

α – Coeficiente de absorção;

ρ – Coeficiente de reflexão;

τ – Coeficiente de transmissão.

O coeficiente de reflexão é a razão entre a quantidade de energia radiante refletida e o total incidente. Para a estimativa deste valor foi medido *in situ* os valores da radiação total incidente e da radiação refletida, em cada um dos tabuleiros, com recurso a piranómetros. Na Tabela 4.1 são apresentados os valores do coeficiente de reflexão de cada tabuleiro assim como do coeficiente de absorção, tendo em conta o princípio da conservação da energia (equação 4.2). Por fim foi calculado o valor médio do coeficiente de absorção de todos os tabuleiros, valor este que foi utilizado para o cálculo da temperatura ar-sol (equação 4.1).

Tabela 4.1: Valores para cálculo do coeficiente de absorção.

Tabuleiro	T3	T5	T6	T7
RS refletida (W/m^2)	90	70	70	110
RS incidente (W/m^2)	380			
Coef. de reflexão	0,24	0,18	0,18	0,29
Coef. de absorção	0,76	0,82	0,82	0,71
Coef. de absorção médio	0,78			

Com os valores dos coeficientes de absorção média e de transferência de calor da superfície exterior é calculada então a temperatura ar-sol, a partir da equação 4.1, para cada dia da campanha, verificando-se, tal como se representa na Tabela 4.2, que o dia mais quente (D+Q) é o dia 27 de junho, com um valor de 56,30°C de temperatura ar-sol.

Tabela 4.2: Máxima temperatura exterior e radiação solar em cada dia

	Temperatura exterior máxima (°C)	Radiação solar diária acumulada (W/m²)	Temperatura ar-sol (°C)
17-jun	42,74	334,05	53,11
18-jun	39,27	336,41	49,72
19-jun	37,89	331,91	48,20
20-jun	40,29	324,17	50,36
21-jun	32,51	266,68	40,79
22-jun	31,03	319,49	40,95
23-jun	32,79	200,27	39,01
24-jun	37,00	322,35	47,01
25-jun	39,05	332,69	49,38
26-jun	42,13	334,76	52,53
27-jun	**45,90**	334,83	**56,30**
28-jun	45,08	**336,84**	55,54
29-jun	41,16	330,92	51,44

Existe a necessidade de utilizar um dos tabuleiros da campanha como um tabuleiro de referência que sirva de comparação para avaliar o comportamento de cada substrato e diferentes vegetações. A escolha do tabuleiro de referência baseia-se naquele que apresenta mais semelhanças relativamente aos outros. Desta forma, e com recurso à Tabela 3.4, foi escolhido o tabuleiro T7 por ter o solo igual a dois dos outros tabuleiros (T5 e T6), permitindo comparar vegetações, e por ter a mesma vegetação do tabuleiro T3, possibilitando a comparação entre os substratos, visto o tabuleiro T3 ser o único com um substrato diferente. Nenhum dos outros tabuleiros, selecionados para este estudo, permite estas duas comparações como o tabuleiro T7.

4.2 Estudo do comportamento térmico durante a campanha de monitorização

Neste subcapítulo será feita uma apresentação dos principais resultados referentes a todo o período da campanha para se perceber quais foram as variações ao longo da mesma no que respeita à temperatura, humidade e radiação solar registada neste período bem como às respetivas consequências no fluxo de calor e temperaturas superficiais nos diferentes tabuleiros. Pretende-se ainda perceber qual a influência da rega no comportamento térmico dos tabuleiros visto que a mesma esteve desligada até dia 18 de junho, à tarde, tendo início ao terceiro dia de campanha (dia 19 de junho). Através dos dados seguidamente apresentados será possível comparar as características térmicas dos dois substratos e das várias vegetações em cada tabuleiro.

Nesta visão geral da campanha serão apresentados os seguintes gráficos:

- Temperatura interior de todos os tabuleiros, temperatura exterior e radiação solar, Figura 4.1;
- Variação da temperatura ambiente interior, superficial interior e superficial exterior de todos os tabuleiros relativas ao tabuleiro de referência e radiação solar, Figura 4.2;
- Fluxos de calor dos tabuleiros T5 e T7 e radiação solar, Figura 4.3;
- Humidade relativa e temperatura do tabuleiro de referência e do exterior, Figura 4.4.

Na Figura 4.1 estão apresentadas as temperaturas interiores dos quatro tabuleiros (Ti,3; Ti,5; Ti,6; Ti,7) e a temperatura exterior (Te). Como complemento, e para melhor análise dos dados, está também representada a radiação solar (RS). Relativamente às temperaturas, a temperatura exterior regista um mínimo de 12°C, no dia 25 de junho, e um máximo de 46°C, no dia 27 de junho. As temperaturas interiores, de uma forma geral, registaram valores mínimos, no dia 25 de junho, a rondar os 17-18°C e máximos, atingidos nos dia 27 e 28 de junho, com valores na ordem dos 35-36°C. A radiação solar registada, no dia 23 de junho, com um valor de 1338W/m^2 corresponde ao máximo observado ao longo da campanha, sendo que o valor máximo diário ronda os 900-1000W/m^2, nos restantes dias.

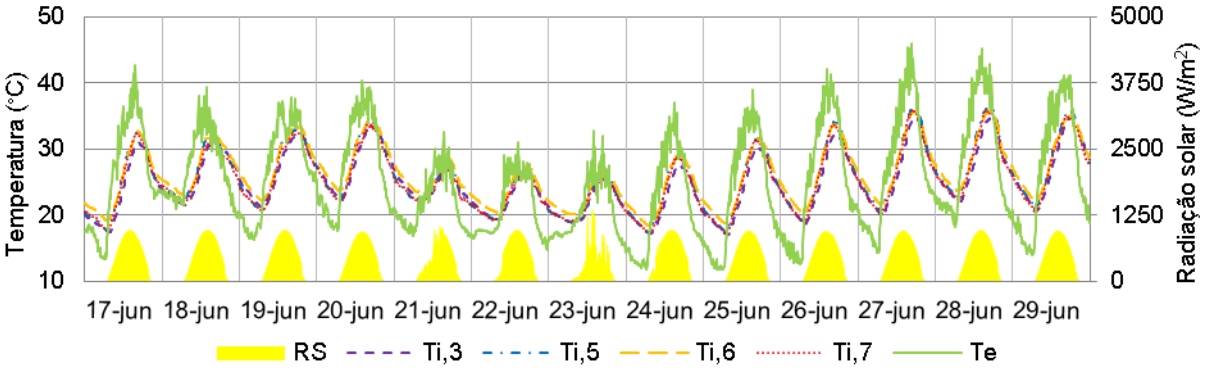


Figura 4.1: Temperatura interior de todos os tabuleiros, temperatura exterior e radiação solar.

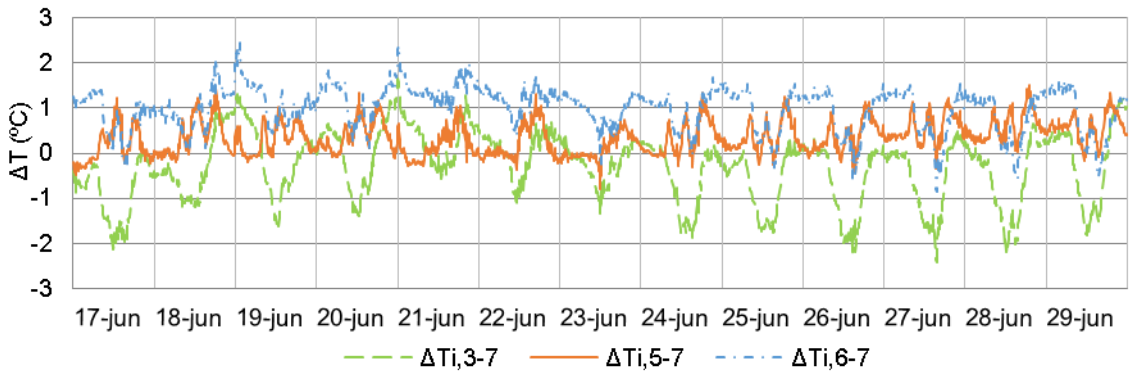
Através da interpretação da Figura 4.1, verificou-se que, apesar da radiação solar ter valores máximos muito idênticos, os valores das temperaturas exterior e interiores têm um comportamento mais irregular ao longo dos dias. Desta forma, pode garantir-se que uma radiação solar máxima não se traduz numa temperatura máxima. Com isto, conclui-se que a temperatura depende de outros fatores para além da radiação solar.

As temperaturas interiores dos tabuleiros, comparadas com a temperatura exterior, apresentam um comportamento padronizado em que, relativamente aos máximos exteriores, em cada dia, as temperaturas são inferiores no interior e relativamente aos mínimos são superiores, mas com variações proporcionais, como era esperado devido ao isolamento térmico conferido pela envolvente térmica dos compartimentos.

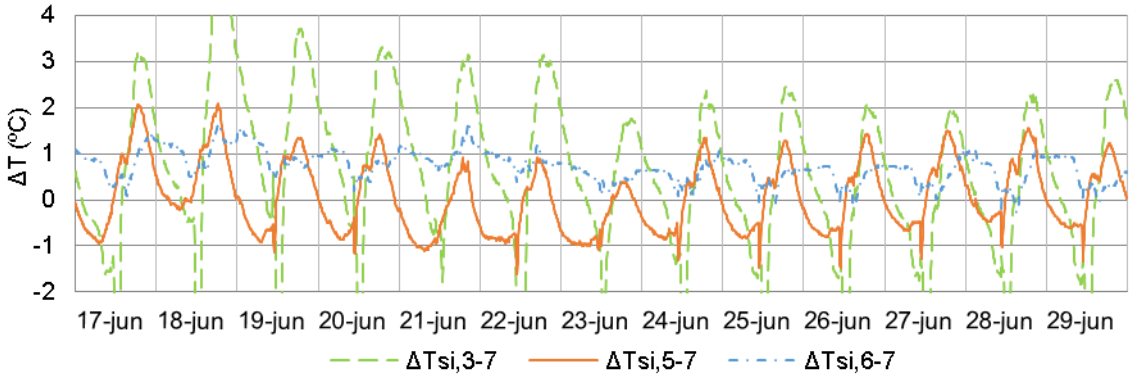
Apesar das diferenças, todos os dias apresentam o mesmo padrão de temperaturas, sendo que, no período de 21 a 23 de junho de 2015, é notória a diminuição da temperatura exterior máxima

e da radiação solar acumulada diária, atingindo respetivamente uma redução de aproximadamente 30% e 40%, relativamente ao dia mais quente, criando o mesmo impacto nas temperaturas interiores dos vários tabuleiros. No entanto não é uma quebra que altere o comportamento padrão das temperaturas, verificado em toda a campanha, como será observado na Figura 4.2.

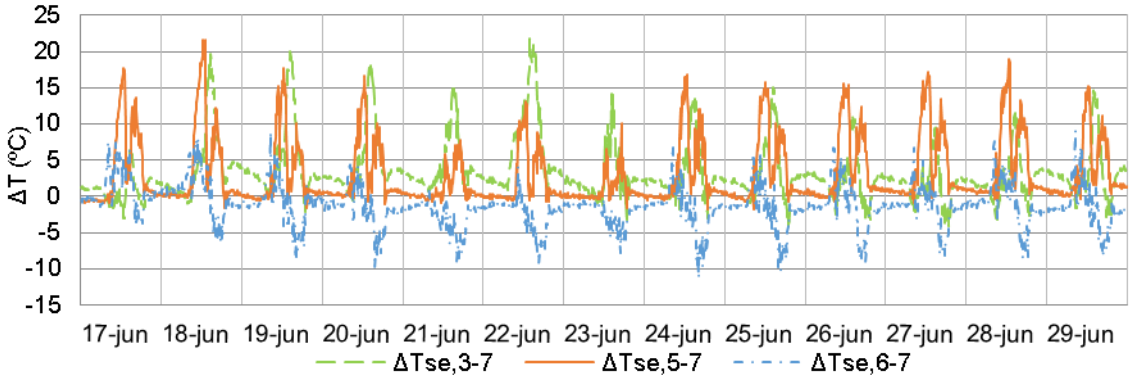
Na Figura 4.2 estão presentes três gráficos que relacionam os quatro tabuleiros através de uma comparação relativa da temperatura ambiente interior (a), da temperatura superficial interior (b) e da temperatura superficial exterior (c) entre cada tabuleiro e o tabuleiro de referência (T7).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.2: Variação da temperatura (a) ambiente interior, (b) superficial interior e (c) superficial exterior de todos os tabuleiros relativa ao tabuleiro de referência.

Na temperatura ambiente interior (Ti), o tabuleiro T3 apresenta variações, quando comparado ao tabuleiro de referência, negativas durante o dia, com diferenças até -2°C, e positivas, até 1°C, ou nulas durante a noite. O tabuleiro T5 tem temperatura superior durante o dia, até 1°C, e igual durante a noite. O tabuleiro T6 tem temperatura ambiente interior superior à do tabuleiro T7, na maior parte do tempo, contudo, durante o período noturno, a diferença é até 2°C e, durante o dia, a temperatura é semelhante à do tabuleiro T5.

Na temperatura superficial interior (Tsi), o tabuleiro T3 apresenta variações na ordem dos 2-3°C no final do dia e, no início do mesmo, temperaturas mais baixas entre -1°C e -2°C; o tabuleiro T5 apresenta o mesmo comportamento que o tabuleiro T3 mas menos acentuado; e o tabuleiro T6 regista o mesmo comportamento para a temperatura ambiente interior.

Na temperatura superficial exterior (Tse), todos os tabuleiros apresentam temperaturas semelhantes durante a noite. Durante o dia os tabuleiros T3 e T5 atingem diferenças superiores a 15°C, em alguns dos dias, sendo que a principal diferença entres eles é o tabuleiro T5 apresentar uma quebra diária que ocorre próximo das 13h, todos os dias, com uma duração de duas horas, e retoma com valores semelhantes ao tabuleiro T3. O tabuleiro T6, durante o dia, apresenta temperaturas mais baixas que o tabuleiro T7, com máximos de -10°C de diferença.

Através dos gráficos da Figura 4.2, em que os tabuleiros são comparados ao de referência, é possível tirar algumas conclusões relativas ao comportamento térmico de cada um dos tabuleiros:

- O tabuleiro T3 apresenta temperaturas ambiente e superficial interiores mais baixas do que o tabuleiro de referência durante o dia, e durante a noite, a temperatura ambiente interior é igual ou superior relativamente ao tabuleiro de referência, enquanto a temperatura superficial interior é sempre superior à do tabuleiro de referência no período noturno. Tendo em conta que estes dois tabuleiros têm substratos diferentes e vegetações iguais pode concluir-se que o solo S1 (Tabuleiro T7 – de referência) sendo, também, mais argiloso (ver Tabela 3.1) tem maior condutibilidade térmica do que o solo S2 (tabuleiro T3) que é um solo mais arenoso (ver Tabela 3.2), e por isso consegue atenuar melhor a temperatura interior do que o tabuleiro com o solo S1. Relativamente à temperatura superficial exterior, este tabuleiro (T3) apresenta valores superiores em quase toda a campanha, contudo mais acentuados durante o dia, o que é explicado com o coeficiente de absorção desse tabuleiro (ver Tabela 4.1): que tem um valor de 0,76, superior aos 0,71 do coeficiente de absorção solar do tabuleiro de referência. Tendo em conta que a espécie vegetal é a mesma, esta diferença deve-se ao facto de, no tabuleiro de referência, visualmente, a vegetação apresentar cores mais vivas e ser mais densa, enquanto no tabuleiro T3, as folhas estão mais secas e são de menor dimensão.
- O tabuleiro T5 contém o mesmo substrato que o tabuleiro de referência (T7), e, através da observação da Figura 4.2(a), conclui-se que as variações de temperatura ambiente interior, relativamente ao tabuleiro de referência, são reduzidas, mas que apesar de serem positivas, não são superiores a 1,5°C. Isto não permite tirar conclusões claras pelo que é necessário analisar os outros gráficos. Pela Figura 4.2(b), sabe-se que o tabuleiro T5 apresenta temperaturas superficiais interiores superiores ao tabuleiro de referência na segunda metade

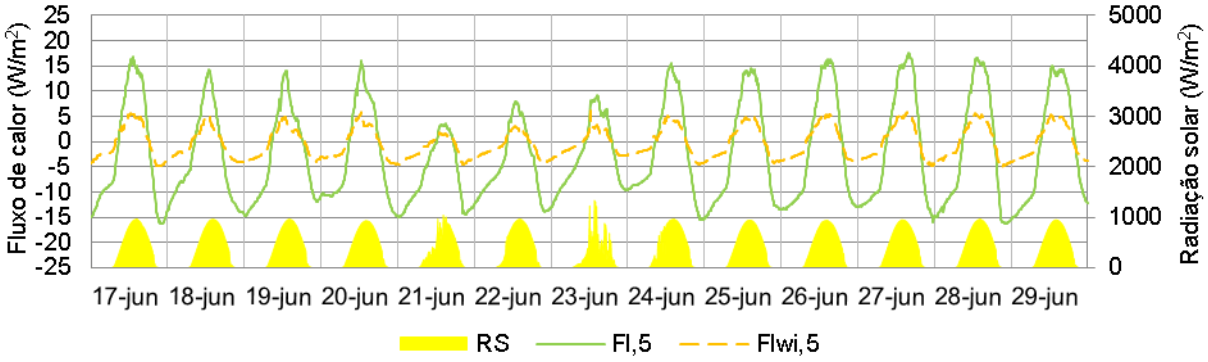
do dia e inferiores na primeira metade, o que revela que houve transferência de calor, pelo substrato, para o interior do tabuleiro, em quantidade superior ao tabuleiro de referência durante o dia. Se a isto for associada a informação do Figura 4.2(c) que revela que a temperatura superficial exterior é superior à registada no tabuleiro de referência durante o dia, pode concluir-se que o tabuleiro T5 está a absorver mais energia pela radiação solar que o tabuleiro de referência. Tendo em conta que o tabuleiro T5 tem todas as espécies vegetais, incluindo o musgo, seria de esperar que a temperatura superficial fosse inferior – devido ao efeito de sombra e evapotranspiração – no entanto, e observando a Tabela 4.1, o valor do coeficiente de absorção do tabuleiro T5 é de 0,82 e o do tabuleiro T7 é de 0,71. Esta diferença de valores é justificada pelo facto de o tabuleiro T5 ter uma vegetação que, durante o período de verão, apresenta tons acastanhados e encontra-se menos densa; e musgo que, estando seco, não realiza o processo de evapotranspiração eficazmente. Por outro lado, o tabuleiro de referência, consegue manter a cor verde e a densidade vegetal, permitindo a manutenção de um coeficiente de absorção mais baixo e um efeito de sombra elevado.

- O tabuleiro T6, na Figura 4.2(a), apresenta a sua temperatura ambiente interior superior à do tabuleiro de referência, durante a noite, e semelhante a este, durante o dia. Como complemento a esta informação, observa-se na Figura 4.2(b), que a temperatura superficial interior também é sempre superior à do tabuleiro de referência. Considerando a Tabela 4.1, onde o coeficiente de absorção do tabuleiro T6 é de 0,82 face a 0,71 do tabuleiro de referência (T7), seria de esperar que a temperatura superficial exterior fosse mais elevada no tabuleiro T6. Contudo, pela Figura 4.2(c), o mesmo não se comprova: a temperatura superficial exterior do tabuleiro T6 é inferior à do tabuleiro de referência, durante o dia. Este fenómeno deve-se ao sombreamento da célula numa determinada altura do dia, que será justificado na análise da Figura 4.6(b) referente ao D+Q.

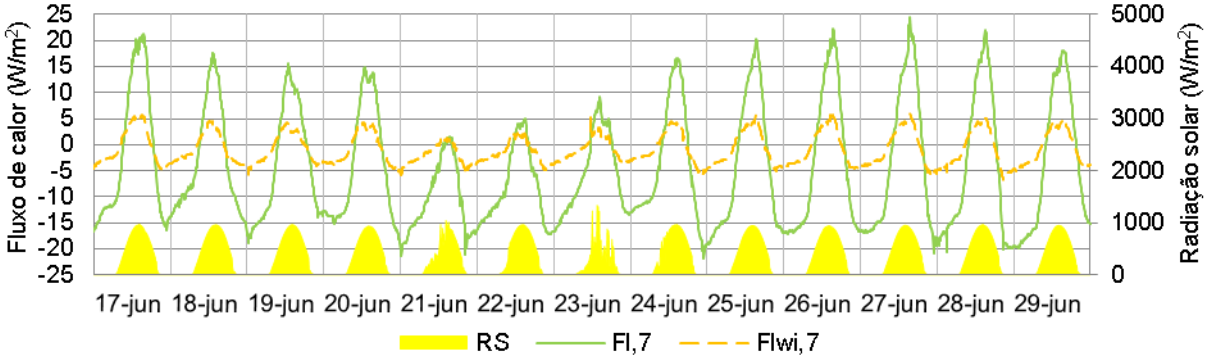
Analisando as diferenças de temperaturas de todos os dias da campanha, estes apresentam o mesmo comportamento, comprovando que apesar da diferença da temperatura exterior (-30%) e da variação da radiação solar (-40%) no período de 21 a 23 de junho, como verificado na Figura 4.1, estas variações não têm impacto suficiente para alterar o comportamento padrão das temperaturas das coberturas.

Os gráficos da Figura 4.3 mostram a variação dos fluxos de calor na zona com isolamento (linha tracejada) e na zona sem isolamento (linha a cheio) acompanhados da radiação solar para uma melhor perceção do período do dia a que se referem os resultados. Na Figura 4.3(a), para o tabuleiro T5, observa-se que o fluxo de calor na zona com isolamento varia entre os -5,3W/m^2 e os 6,2W/m^2, sendo os valores máximos em cada dia relativamente próximos destes, com exceção dos dias 21, 22 e 23 de junho onde os máximos foram inferiores, atingindo valores na ordem dos 3-4W/m^2. Na zona sem isolamento, o fluxo varia entre os -16,3W/m^2 e os 17,6W/m^2, onde ocorreu o mesmo fenómeno que na zona com isolamento, nos três dias anteriormente mencionados, os fluxos máximos, para esta zona, atingiram valores até aos 9W/m^2. No tabuleiro T7, Figura 4.3(b), a zona com isolamento apresenta valores entre -6,5W/m^2 e 6,1W/m^2 enquanto na zona sem isolamento os valores variam entre -

21,8W/m² e 24,5W/m². Nesta figura também foram verificados os mesmos fenómenos da Figura 4.3(a) para o mesmo período de 21 a 23 de junho.



(a)



(b)

Figura 4.3: Fluxo de calor da zona com e sem isolamento e radiação solar: (a) Tabuleiro T5; (b) Tabuleiro T7.

Na Figura 4.3 é clara a distinção entre as zonas com isolamento e as zonas sem isolamento. Em ambos os gráficos a variação diária do fluxo de calor da zona com isolamento foi bastante inferior à zona sem isolamento, o que vai de acordo com o esperado visto ser esta a principal função da incorporação de isolante térmico – minimizar as trocas de calor. Contudo, para serem obtidos valores concretos é necessário analisar o gráfico da Figura 4.8, referente ao D+Q.

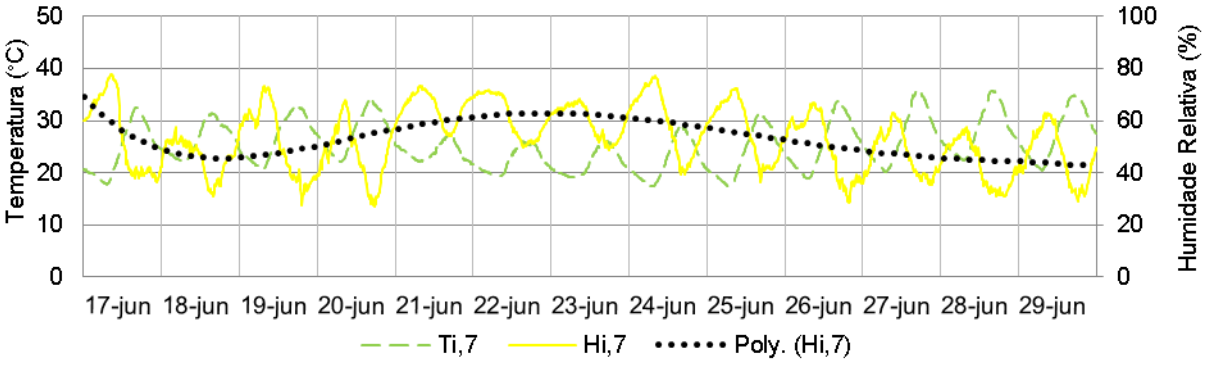
Na mesma Figura 4.3, no período de 21 a 23 de junho, é verificado que o fluxo de calor no período diurno, na zona com isolamento, é semelhante ao da zona sem isolamento. Isto revela o impacto da diminuição da temperatura ambiente exterior e da radiação solar acumulada, sendo que, comparativamente ao dia mais quente, com uma redução de 30% na temperatura e 40% na radiação solar, ocorreu uma diminuição de 60-80% do fluxo de calor, entre as 13h e as 16h, no período de maior radiação solar, no período de 21 a 23 de junho, relativos ao fluxo de calor no mesmo período do dia mais quente. Contudo as perdas, durante a noite, mantiveram-se iguais aos restantes dias.

Na Figura 4.4 estão expressos valores de humidade relativa (linha a cheio) e temperatura (linha a tracejado) respetivamente no ambiente interior (a) e exterior (b). Na Figura 4.4(a), referente ao interior

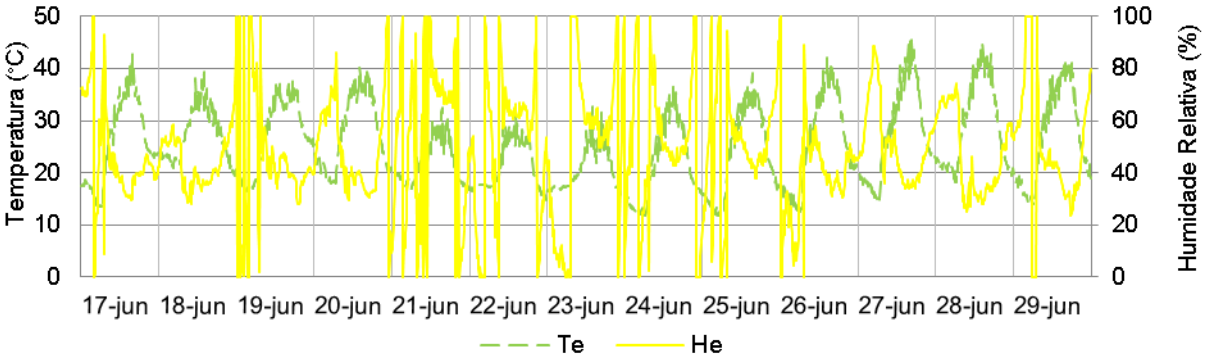
do tabuleiro de referência, a humidade apresenta valores entre os 27% e os 78% e a temperatura entre os 17°C e os 36°C.

No gráfico referente ao ambiente exterior, Figura 4.4(b), a humidade tem valores entre os 0% e os 100% e a temperatura tem valores compreendidos entre 12°C e 46°C, como enunciado anteriormente na Figura 4.1.

É de salientar a linha ponteada, presente na Figura 4.4(a), que representa uma linha de tendência da humidade relativa. O andamento desta começa com um valor elevado, na ordem dos 70%, e regista-se decrescente no primeiro dia, estabilizando nos 45% no segundo dia. Do segundo ao último dia, cujos valores são praticamente iguais, a linha faz uma curva com forma de onda com um máximo de cerca de 65% às 00h do dia 23.



(a)



(b)

Figura 4.4: Humidade relativa e temperatura: (a) Interior do tabuleiro de referência (Hi,7 e Ti,7); (b) Exterior (He e Te).

Na Figura 4.4, estão presentes a humidade relativa e temperatura ambiente interior e ambiente exterior do tabuleiro de referência. De forma geral, a temperatura e a humidade relativa do ambiente interior mantiveram valores coerentes sendo a humidade mais elevada na primeira metade do dia e menor na segunda metade, enquanto para a temperatura foi observado o inverso. No gráfico da Figura 4.4(a), a linha de tendência tem o seu máximo no dia 23 de junho. Se a este dado juntarmos a diminuição da temperatura interior que, como se pode observar na Figura 4.1, está associada a uma

diminuição da temperatura exterior e à existência de alguma nebulosidade, pela irregularidade de valores da radiação solar ao longo do dia 23 de junho. No dia 21 de junho também se notam algumas irregularidades pelo que se considerou que também foi outro dia com nebulosidade. A humidade relativa interior, no período de 21 a 23 de junho, apresentou um aumento médio diário de cerca de 20%, relativamente aos restante dias, sendo esta uma possível consequência da diminuição da temperatura ambiente exterior e da radiação solar acumulada diária.

Quanto à humidade relativa exterior, esta é completamente irregular sem nenhum padrão aparente ao longo de toda a campanha. Ao não existir nenhum dia com precipitação (ver Figura 4.5) e o equipamento de medição estar fora do contato dos sistemas de rega, não existe explicação para os valores de 100% nem para os de 0% de humidade, especialmente no que respeita a variações tão acentuadas, tudo indicando que o equipamento não recolheu/registou os valores corretamente.

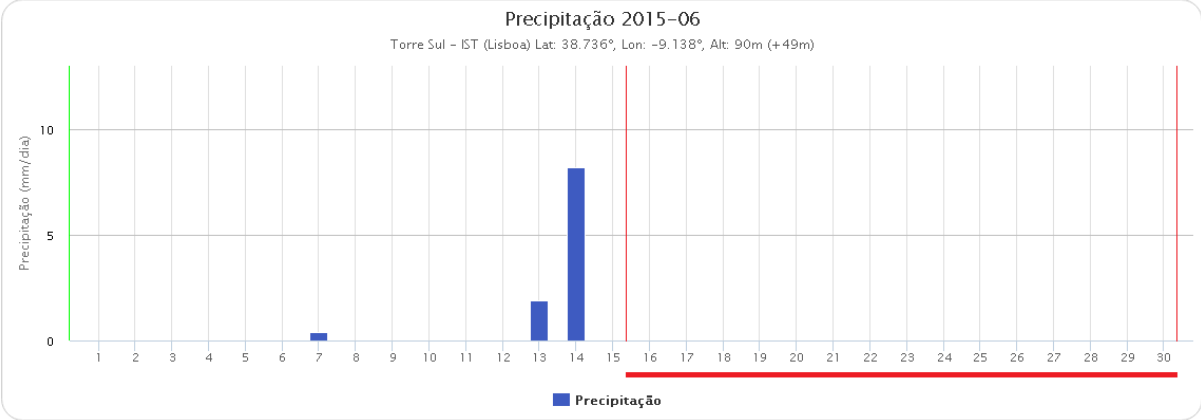


Figura 4.5: Precipitação do mês de junho – período da campanha, 15 a 30 de junho (dados de meteoIST).

4.3 Estudo do comportamento térmico no dia tipo – D+Q

De modo a avaliar com maior detalhe as diferentes variáveis analisa-se de seguida um dia tipo, neste caso o mais desfavorável numa situação de comportamento térmico de coberturas verdes que, estando na época de verão, será o dia mais quente (D+Q).

O estudo deste dia vai tornar possível a análise da variação da temperatura ao longo do solo em profundidade, ao longo do dia tipo, e, com o complemento da análise dos fluxos de calor, fazer a comparação entre a zona com isolamento e sem isolamento bem como analisar o impacto do substrato na cobertura.

Aqui será primeiramente apresentada a Tabela 4.3, com os valores médios, máximos e mínimos de cada parâmetro do D+Q que correspondem a 27 de junho de 2015. De seguida serão apresentados os gráficos pertinentes a uma análise orientada para os objetivos definidos:

- Temperatura ambiente interior e superficial exterior de todos os tabuleiros, temperatura exterior e radiação solar no D+Q, Figura 4.6;

- Fluxo de calor da zona com e sem isolamento nos tabuleiros T5 e T7 e radiação solar no D+Q, Figura 4.8;
- Fluxo de calor da zona com isolamento do tabuleiro de referência e fluxo de calor calculado da placa de isolamento com radiação solar no D+Q, **Error! Reference source not found.**;
- Temperaturas do substrato do tabuleiro de referência e radiação solar no D+Q, Figura 4.10;
- Temperatura do substrato do tabuleiro de referência em profundidade em várias horas do D+Q, Figura 4.11 e Figura 4.12.

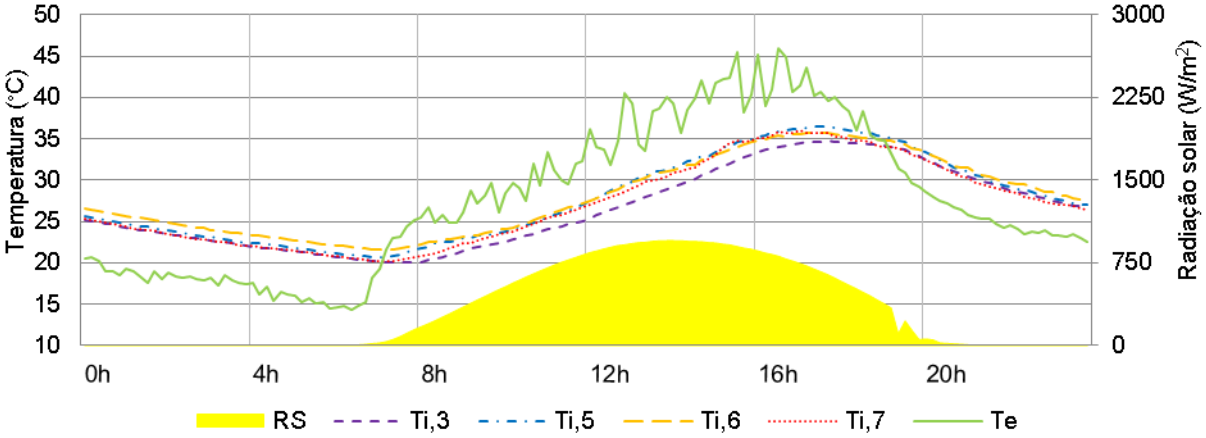
Na Tabela 4.3 estão representados todos os parâmetros, medidos na campanha, juntamente com os seus valores médios, máximos e mínimos relativos ao D+Q.

Tabela 4.3: Valores médios, máximos e mínimos de todos os parâmetros medidos nos quatro tabuleiros no D+Q.

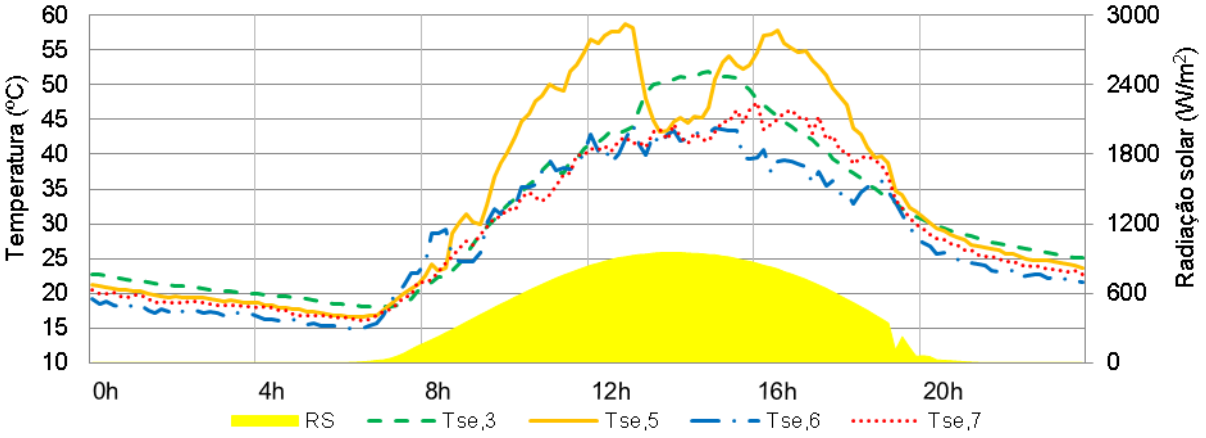
				Valor		
			Parâmetros	**Médio**	**Máximo**	**Mínimo**
Temperatura (°C)	**Exterior**		Te	27,63	45,90	14,28
	T3	**Sem isolamento**	Tse,3	31,03	51,92	17,99
			Th1,3	28,63	37,19	21,05
			Th2,3	28,53	36,11	21,33
			Tsi,3	27,81	35,37	18,24
		Com isolamento	Tse^{wi},3	29,61	52,00	16,66
			$Th1^{wi}$,3	28,23	35,58	21,37
			$Th2^{wi}$,3	28,23	35,59	18,90
			Tsi^{wi},3	26,72	35,82	18,28
		Interior	Ti,3	26,58	34,75	20,00
	T5	**Sem isolamento**	Tse,5	33,44	58,81	16,54
			Th1,5	28,66	36,77	21,60
			Th2,5	28,50	35,12	22,70
			Tsi,5	28,33	34,93	22,66
		Com isolamento	Tse^{wi},5	27,56	47,52	15,62
			$Th1^{wi}$,5	27,28	35,24	20,93
			$Th2^{wi}$,5	27,49	33,50	22,00
			Tsi^{wi},5	27,80	36,16	21,49
		Interior	Ti,5	27,69	36,49	20,65
	T6	**Sem isolamento**	Tse,6	27,98	44,26	14,85
			Th1,6	27,68	32,49	22,53
			Th2,6	28,39	33,30	23,72
			Tsi,6	28,69	34,03	23,72
		Com isolamento	Tse^{wi},6	29,58	45,75	16,23
			$Th1^{wi}$,6	28,50	36,39	21,09
			$Th2^{wi}$,6	28,68	34,32	23,50
			Tsi^{wi},6	28,33	35,69	22,07
		Interior	Ti,6	27,98	35,71	21,58
	T7	**Sem isolamento**	Tse,7	29,31	47,55	16,11
			Th1,7	28,25	35,09	22,61
			Th2,7	28,18	33,91	23,63
			Tsi,7	28,15	33,47	23,19
		Com isolamento	Tse^{wi},7	29,98	52,58	16,53
			$Th1^{wi}$,7	28,40	36,58	21,61
			$Th2^{wi}$,7	28,27	34,21	23,07
			Tsi^{wi},7	27,08	35,63	20,25
		Interior	Ti,7	27,14	35,96	20,20
Fluxo de calor (W/m^2)	**T5**	**Sem isolamento**	Fl,5	-0,91	17,59	-15,86
		Com isolamento	Fl^{wi},5	0,06	5,85	-4,69
	T7	**Sem isolamento**	Fl,7	-3,20	24,50	-20,88
		Com isolamento	Fl^{wi},7	-0,76	6,07	-5,79
Radiação solar (W/m^2)			RS	334,83	952,11	0,00

No gráfico (a) da Figura 4.6, estão apresentadas as temperaturas interiores dos quatro tabuleiros (Ti,3; Ti,5; Ti,6; Ti,7), a temperatura exterior (Te) e a radiação solar (RS). A temperatura exterior tem um mínimo de 14°C às 04h20m e um máximo de 46°C às 16h30m. As temperaturas interiores mínimas e máximas, nos tabuleiros, foram respetivamente, 20-21°C e 35-36°C. As temperaturas mínimas ocorreram entre as 07h00m e as 07h10m e as máximas entre as 17h00m e as 17h40m. A radiação solar atinge um máximo de 952W/m^2 e o sol nasceu perto das 06h00m e pôs-se aproximadamente às 21h30m, o que equivale a cerca de 15h30m de luz no D+Q.

Na Figura 4.6(b), estão presentes as temperaturas superficiais exteriores, na zona sem isolamento, de todos os tabuleiros (Tse,3; Tse,5; Tse,6; Tse,7) e a radiação solar (RS). A temperatura mínima ocorre por volta das 07h00m com valores entre os 15°C e os 18°C. O comportamento noturno dos quatro tabuleiros é semelhante entre si (i.e. entre as 17h30m e as 09h00m) mas durante o dia isto não se verifica. O tabuleiro T5 destaca-se dos restantes atingindo dois máximos: um de 59°C às 13h00m e outro de 58°C às 16h30m – entre estas horas a temperatura superficial sofreu um decréscimo de 15°C. O tabuleiro T3 destacou-se dos outros às 13h00m atingindo um máximo de 52°C às 14h50m enquanto o tabuleiro T6 teve o seu máximo de 44°C às 15h00m e o tabuleiro T7, 48°C às 16h00m.



(a)



(b)

Figura 4.6: D+Q: (a) Temperatura interior de todos os tabuleiros, temperatura exterior e radiação solar; (b) Temperatura superficial exterior de todos os tabuleiros e radiação solar.

Pela Figura 4.6(a) confirma-se o explicado na Figura 4.1 relativamente a toda a campanha: os valores das temperaturas interiores são mais estáveis e de menor amplitude relativamente à temperatura exterior. Também se nota que as temperaturas interiores e exterior começam a subir assim que o valor da radiação solar começa a aumentar, implicando, desta forma, uma relação da radiação solar com as temperaturas mas, como visto anteriormente, a radiação solar não é condição suficiente para saber quais as temperaturas para esse mesmo dia.

Na Figura 4.6(b), é de salientar duas anomalias provenientes da mesma causa. O primeiro caso é relativamente ao tabuleiro T5, onde foi observada, entre as 13h00m e as 16h30m, uma quebra da temperatura no valor de 15°C com o posterior retorno à temperatura inicial. A segunda situação reporta-se ao tabuleiro T6, cuja temperatura superficial exterior, entre as 15h30m e as 18h30m, é inferior ao tabuleiro de referência, e pela análise da Figura 4.2, seria de esperar o contrário. Estas duas situações são justificadas pelo sombreamento dos termopares. Estes dois tabuleiros apresentam ambos vegetação com alturas elevadas e, por observação das fotografias presentes na Figura 4.7, é possível verificar a densidade vegetal que se encontra a sombrear a célula do tabuleiro T5 e o sombreamento provocado, por uma das plantas, no Tabuleiro T6. Nos restantes tabuleiros, as consequências do sombreamento das células não foram tão acentuadas devido a estes apresentarem uma vegetação mais rasteira e de folhagem mais fina.

(a) **(b)** **(c)**

Figura 4.7: Sombreamento das células: (a) Planta a fazer sombreamento sobre a célula Tse,6 (fotografia tirada após 18:30); (b) Densidade vegetativa sobre a célula Tse,5.

Os fluxos de calor presentes na Figura 4.8 são referentes aos tabuleiros T5 e T7, quer na zona com isolamento (Fl^{wi},5 e Fl^{wi},7), quer na zona sem isolamento (Fl,5 e Fl,7). Este gráfico é acompanhado pela curva da radiação solar (RS), já apresentada na Figura 4.6.

O tabuleiro T5 tem um fluxo de calor, na zona com isolamento, compreendido entre -4,7W/m^2 e 5,9W/m^2 enquanto o tabuleiro T7 varia entre -5,8W/m^2 e 6,1W/m^2. Na zona sem isolamento, o tabuleiro T5 apresenta valores entre -15.9W/m^2 e 17,6W/m^2 e o tabuleiro T7 entre -20,9W/m^2 e 24,5W/m^2. Os valores máximos ocorrem por volta das 15h30m enquanto os valores mínimos às 23h00m.

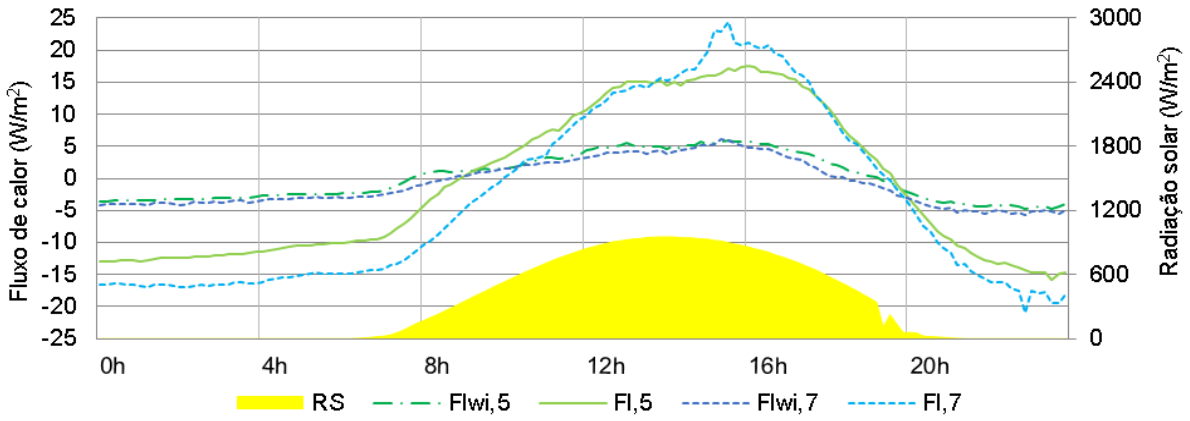


Figura 4.8: Fluxo de calor da zona com e sem isolamento nos tabuleiros T5 e T7 e radiação solar no D+Q.

Na Figura 4.8, observa-se em pormenor que, na zona com isolamento, os fluxos são muito mais estáveis do que na zona sem isolamento. Esta diferença entre zonas tem um impacto de 67% no tabuleiro T5 e de 75% no tabuleiro T7, na redução do fluxo de calor descendente durante o dia. Durante a noite, com o sentido do fluxo ascendente, foram obtidos valores de 70% e 68% de melhoria, respetivamente, nas zonas com isolamento térmico dos tabuleiros T5 e T7.

Na **Error! Reference source not found.** está exposto o fluxo de calor do tabuleiro de referência T7) na zona com isolamento (Fl^{wi},7) e o fluxo de calor calculado da placa de isolamento térmico do mesmo tabuleiro (Fl^{ic},7). À semelhança dos gráficos anteriores este é acompanhado pela radiação solar (RS) para uma melhor perceção do dia. Neste gráfico será possível avaliar qual a contribuição do substrato e da vegetação na cobertura, onde será comparada uma solução calculada apenas com isolamento térmico à solução experimental da cobertura com isolamento térmico.

O fluxo de calor calculado da placa de isolamento térmico tem por base a Lei de Fourier, exemplificada na Equação 4.3, que é a lei física da condução de calor e enuncia que o fluxo de calor que passa entre dois pontos é diretamente proporcional ao gradiente negativo de temperatura entre eles.

$$\boldsymbol{q''} = \frac{\boldsymbol{Q}}{\boldsymbol{A}} = -\boldsymbol{\lambda}\frac{\boldsymbol{dT}}{\boldsymbol{dx}}\left[{}^{\boldsymbol{W}}/_{\boldsymbol{m}^2}\right] \tag{4.3}$$

Em que:

q'' – Fluxo de calor [W/m²];

Q – Taxa de transferência de calor por unidade de tempo [J/s ou W];

A – Área da secção [m²];

λ – Condutibilidade térmica do material [W/m°C];

dT – Diferença de temperaturas [°C];

dx – Espessura do material [m].

Numa situação concreta substitui-se dT por $T_{\mathrm{e}} - T_{\mathrm{i}}$, dx por e, adota-se a área da secção unitária e sabe-se que a resistência térmica, R_T [m²°C/W], corresponde ao inverso da condutância $\left(\frac{\lambda}{e}\right)$. Com isto e ignorando o sinal negativo, por se conhecer o sentido do fluxo, obtém-se:

$$\boldsymbol{Q} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{R_T}}(\boldsymbol{T}_{\mathbf{e}} - \boldsymbol{T}_{\mathbf{i}}) \left[\boldsymbol{W}/_{\boldsymbol{m}^{\mathbf{2}}}\right] \quad \textbf{(4.4)}$$

Em que:

T_{e} – Temperatura ambiente exterior em cada instante [°C];

T_{i} – Temperatura ambiente interior em cada instante [°C].

Para calcular a resistência térmica (R_T) de uma superfície tem de se somar as resistências superficiais interior (R_{si}) e exterior (R_{se}) e a resistência do material constituinte do elemento (R_1). A R_T é dada pela seguinte expressão (Equação 4.5):

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_{se} \left[m^2{}^{\underline{o}}C/_W\right] \quad \textbf{(4.5)}$$

Seguidamente substitui-se na Equação 4.4 a resistência térmica, obtendo-se a seguinte equação de cálculo do fluxo em cada instante:

$$\boldsymbol{Q} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{R_{si}} + \frac{\boldsymbol{e}}{\boldsymbol{\lambda}} + \boldsymbol{R_{se}}}(\boldsymbol{T}_{\mathbf{e}} - \boldsymbol{T}_{\mathbf{i}}) \left[\boldsymbol{W}/_{\boldsymbol{m}^{\mathbf{2}}}\right] \quad \textbf{(4.6)}$$

Na Equação 4.6, a taxa de transferência de calor em cada instante, Q, é equivalente ao fluxo de calor calculado da placa de isolamento térmico, Fl^{ic},7, sendo esta de poliestireno extrudido, com uma condutibilidade térmica de 0,037W/m°C, segundo as tabelas do ITE-50 do LNEC, e uma espessura de 0,03m. A temperatura ambiente interior corresponde ao tabuleiro T7 (Ti,7). Nesta equação os valores de R_{se} e de R_{si}, segundo o Dec. Lei nº 80/2013 de 28 de novembro, tomam valores teóricos, respetivamente, de 0,04m²ºC/W e 0,10m²ºC/W.

Na Figura 4.9 é possível verificar que o fluxo de calor na zona com isolamento do tabuleiro T7 varia entre -6,8W/m² e 12,6W/m² e o fluxo de calor calculado da placa de isolamento térmico, através da equação 4.4 varia entre -6,1W/m² e 26,1W/m².

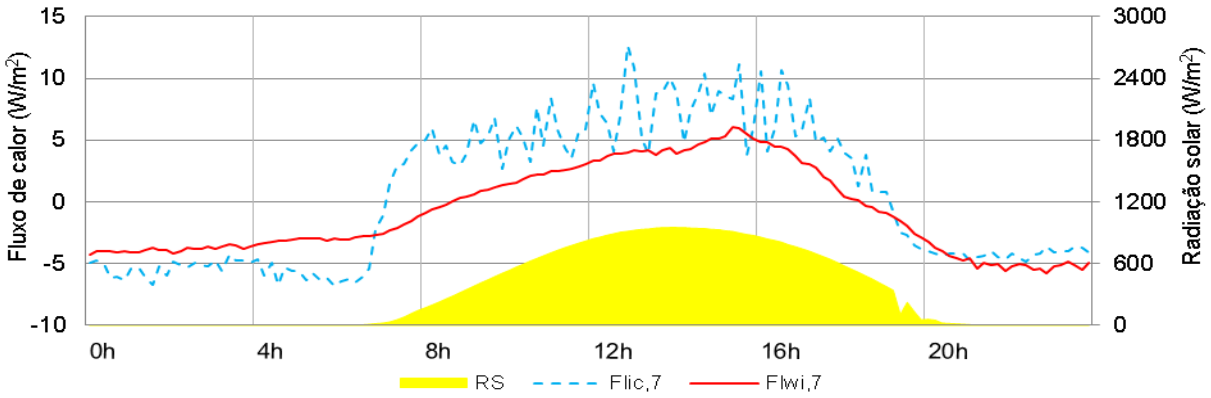
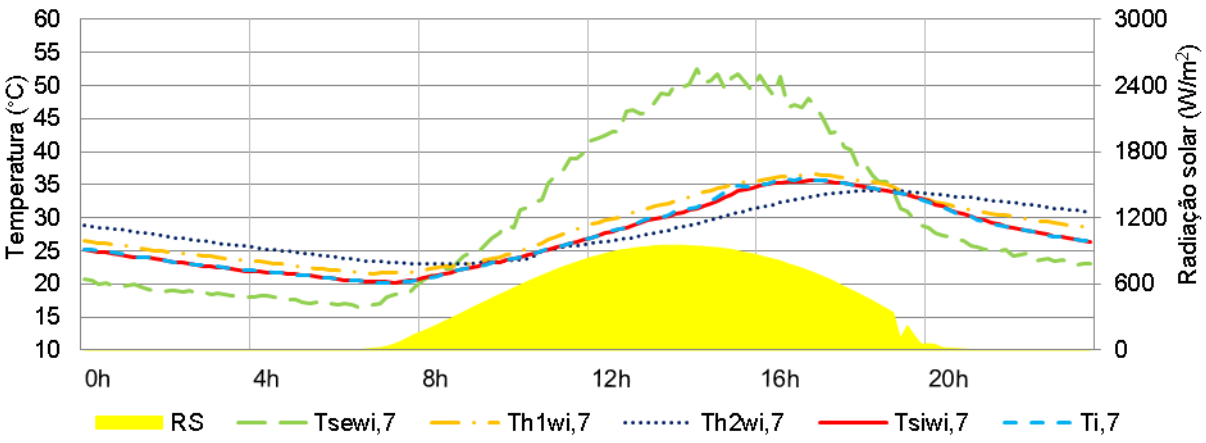


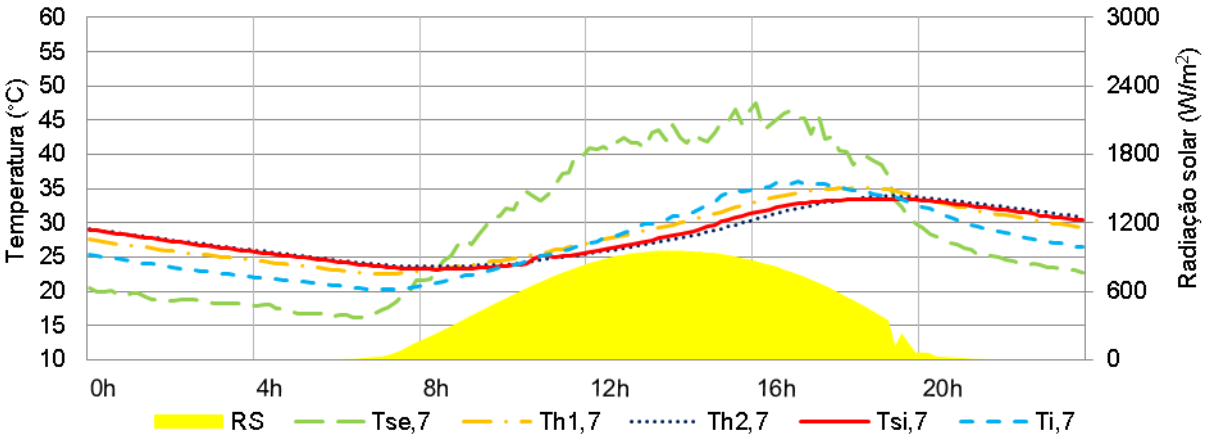
Figura 4.9: Fluxo de calor da zona com isolamento do tabuleiro de referência e fluxo de calor calculado da placa de isolamento com radiação solar no D+Q.

É evidente, na Figura 4.9, que uma solução apenas com isolamento térmico (linha a tracejado), no final do dia, até às 24h, tem um comportamento semelhante a uma solução da cobertura com o isolamento térmico, o substrato e a vegetação. Durante o período diurno o mesmo não se verifica, existindo uma diferença média máxima nos fluxos de calor de 5W/m^2, ou seja, o fluxo através da solução só com a placa de isolamento chega a ser o dobro do fluxo que atravessa a solução com isolamento térmico, substrato e vegetação. A partir das 00h, até ao nascer do sol é visível que existe uma diferença média nos fluxos, que é inferior à observada durante o dia, ou seja, durante o período noturno, a solução só com a placa de isolamento térmico permite uma passagem de fluxo de 3-4W/m^2 superior à solução com isolamento térmico, substrato e vegetação. Contabilizando o período noturno e diurno, a contribuição do substrato e da vegetação na cobertura apresenta um impacto de 41%. Posto isto, pode concluir-se que o isolamento térmico quando acompanhada de um substrato e vegetação, apresenta vantagens térmicas para o período diurno, enquanto durante a noite, a sua contribuição é menor, e no final no dia é inexistente.

Na Figura 4.10 estão presentes dois gráficos do tabuleiro de referência (T7), com as temperaturas do solo, superficiais e ambiente interior, respetivamente a zona com isolamento e sem isolamento. No que diz respeito à temperatura superficial exterior, na zona com isolamento (Tse^{wi},7) é atingido o máximo às 14h30m com um valor de 53°C e um mínimo de 17°C às 06h30m, enquanto na zona sem isolamento (Tse,7) o máximo ocorre às 16h00m com um valor de 48°C e um mínimo de 16°C também às 06h30m. A temperatura do solo à altura h1 (6,5 cm do exterior), na zona com isolamento (Th1^{wi},7), apresenta um máximo de 37°C às 17h20m e um mínimo de 22°C às 06h50m. Na zona sem isolamento (Th1,7), o máximo é de 35°C às 18h50m e o mínimo de 23°C às 07h00m, apenas dez minutos depois do que na zona com isolamento. Na base do substrato (altura h2), na zona com isolamento (Th2^{wi},7), o máximo é de 34°C às 19h10m e o mínimo de 23°C às 08h00m. Na zona sem isolamento (Th2,7), o máximo é semelhante ao valor da zona com isolamento e ocorre aproximadamente à mesma hora sendo o mínimo de 24°C às 08h20m. A temperatura interior (Ti,7), que é igual nas duas zonas, tem um máximo de 36°C às 17h00m e um mínimo de 20°C às 07h10m. A temperatura superficial interior, na zona com isolamento (Tsi^{wi},7), tem um máximo de 36°C, (semelhante a Ti,7) às 17h20m e um mínimo de 20°C às 07h20m. Na zona sem isolamento (Tsi,7), o máximo é de 33°C (semelhante a Th2,7) às 19h20m e o mínimo de 23°C às 08h20m.



(a)



(b)

Figura 4.10: Temperaturas do substrato do tabuleiro de referência na (a)zona com isolamento e na (b)zona sem isolamento e a radiação solar no D+Q.

O que se destaca como principal diferença da Figura 4.10(a), zona com isolamento, para a Figura 4.10(b), zona sem isolamento é a temperatura superficial interior, onde, na primeira, esta é semelhante à temperatura interior do tabuleiro de referência, enquanto, na **Error! Reference source not found.**(a), a temperatura superficial interior apresenta valores mais próximos à temperatura da altura h2 (base do substrato). Daqui se conclui que na zona com isolamento, em que a temperatura superficial interior (Tsi^{wi},x) é obtida da superfície da camada de isolamento, esta é igual à temperatura interior (Ti,*x*) – pois a camada de poliestireno extrudido garante o isolamento do tabuleiro para a zona interior criada artificialmente. Na zona sem isolamento, em que a temperatura superficial interior (Tsi,*x*) é obtida da parte inferior da chapa do tabuleiro e, sendo este material um bom condutor térmico, a temperatura é mais semelhante à temperatura do solo à altura h2=0cm (Th2,*x*) do que à temperatura ambiente interior (Ti,*x*). Assim se demonstra a vantagem de utilização de isolamento térmico de poliestireno extrudido.

Também, pela visualização das figuras anteriores, é possível retirar conclusões relativamente à influência da rega nas temperaturas do tabuleiro. Em concreto: não é possível conhecer qual a hora de rega porque não há nenhuma oscilação nas temperaturas registadas que indiciem um período de rega. Sabe-se que esta ocorria às 08h00m, mas nessa hora não existe qualquer tipo de quebra ou

irregularidade nas temperaturas levando a admitir que a rega administrada não tem qualquer influência nas características térmicas do substrato. Sabe-se, também, que o método de rega utilizado nestes tabuleiros é por gota-a-gota ou pulverização, qualquer dos dois muito eficiente, administrando apenas o necessário para a vegetação presente, não tornando o substrato húmido o suficiente de forma a influenciar o seu comportamento térmico.

Na Figura 4.11 e na Figura 4.12 estão presentes os perfis verticais de temperatura. A altura em centímetros no eixo vertical representa a profundidade do estrato e a localização no plano vertical de todas as sondas de temperatura. Os oito gráficos representam individualmente cada tabuleiro, na zona com e sem isolamento, respetivamente: os gráficos (a1) e (a2) referentes ao tabuleiro T3; os gráficos (b1) e (b2) ao tabuleiro T5; (c1) e (c2) ao tabuleiro T6; e (d1) e (d2) ao tabuleiro T7.

À cota -10cm estão representadas as temperaturas interiores (Ti,*x*), que são iguais na zona com isolamento e na zona sem isolamento de cada tabuleiro. Esta altura foi uma altura aproximada da colocação das sondas no tabuleiro e, neste caso, é meramente representativa para uma melhor leitura dos dados. Às cotas -5cm e -2cm estão presentes as alturas superficiais interiores, respetivamente, da zona com isolamento (Tsi^{wi},*x*) e da zona sem isolamento (Tsi,*x*). A espessura de 2cm é a espessura do tabuleiro, as duas camadas de geotêxtil e a membrana drenante. Os 5cm é a soma dos 2cm com os 3cm de espessura da placa de isolamento térmico em poliestireno extrudido. Assim tem-se:

- À cota de 0cm as temperaturas junto à base do substrato ($Th2^{wi}$,*x* e Th2,*x*);
- À cota de 6,5cm as temperaturas correspondentes à altura h1 ($Th1^{wi}$,*x* e Th1,*x*);
- À cota de 13cm as temperaturas superficiais exteriores (Te^{wi},*x* e Te,*x*);
- À cota de 20cm representa-se a temperatura exterior (Te) – sendo esta cota arbitrária e igual em todos os gráficos.

Em cada gráfico representam-se seis perfis verticais de temperatura, onde cada um representa uma hora do dia (i.e. 0h, 4h, 8h, 12h, 16h e 20h).

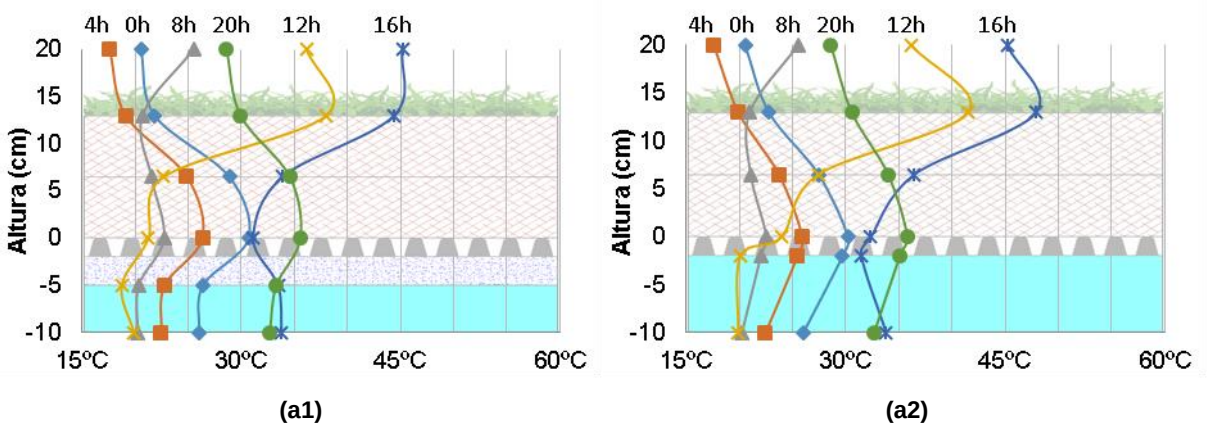


Figura 4.11: Temperatura do substrato dos quatro tabuleiros em profundidade em várias horas do D+Q: (a1) T3 c/ isolamento; (a2) T3 s/ isolamento.

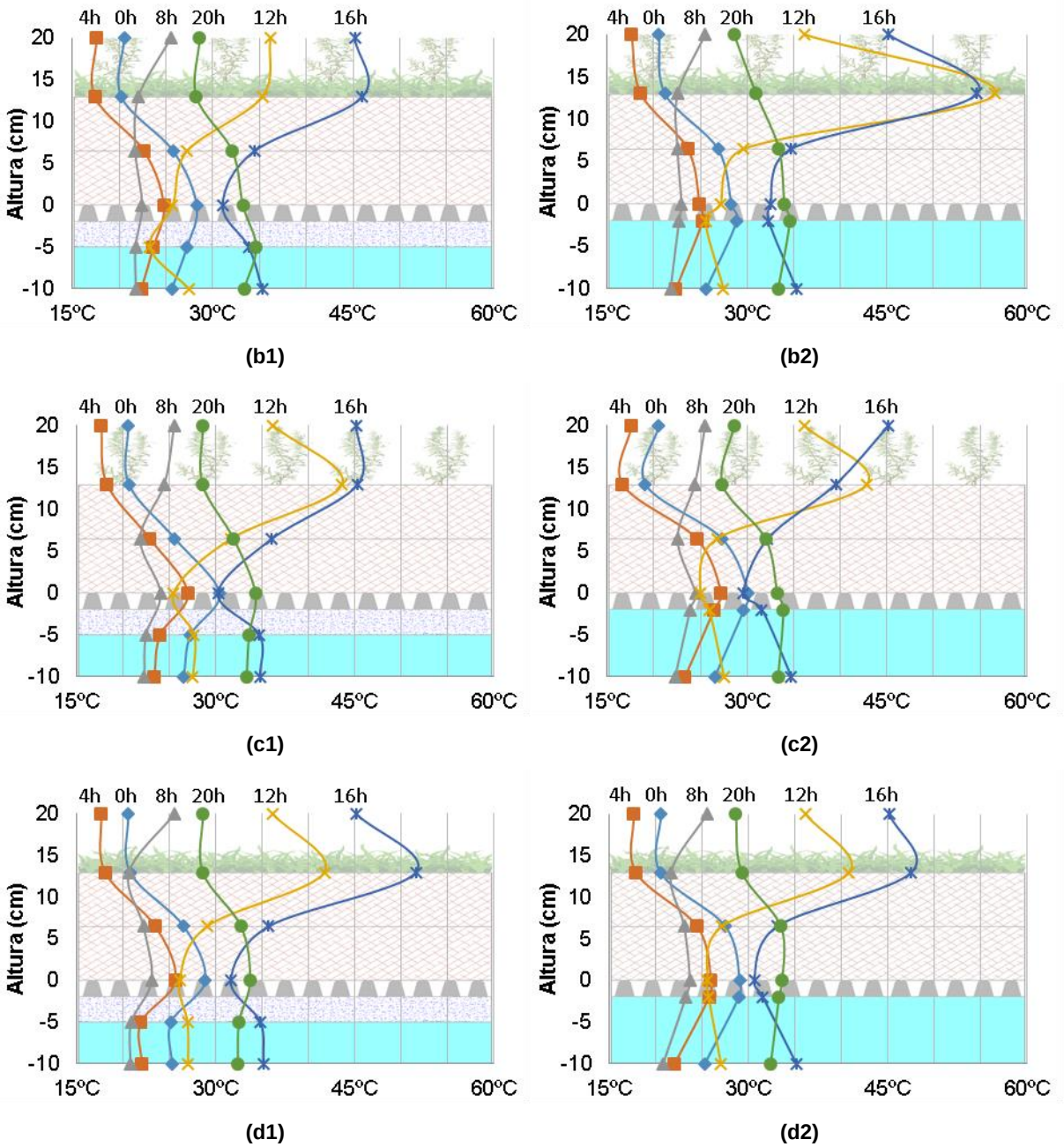


Figura 4.12: Temperatura do substrato dos quatro tabuleiros em profundidade em várias horas do D+Q: (b1) T5 c/ isolamento; (b2) T5 s/ isolamento; (c1) T6 c/ isolamento; (c2) T6 s/ isolamento; (d1) T7 c/ isolamento; (d2) T7 s/ isolamento.

Na Figura 4.11e na Figura 4.12, de uma forma geral, o comportamento é semelhante em todos os tabuleiros:

- Às 00h00m, as temperaturas nas camadas superiores (i.e. superficial exterior e ambiente exterior) são menores do que nas camadas inferiores (i.e. h1, h2, superficial interior e ambiente interior) devido à temperatura exterior ser inferior à temperatura interior do tabuleiro – isto explica-se através do possível armazenamento de calor no interior dos tabuleiros no dia anterior que possivelmente se encontra a ser libertado durante a noite.

- Todas as temperaturas, às 04h00m diminuíram na mesma proporção, o que se justifica com os tabuleiros estarem num estado de equilíbrio, onde as perdas são iguais em todas as camadas.
- Às 08h00m, nas camadas superiores (i.e. superficial exterior e ambiente exterior), observa-se um aumento da temperatura devido apenas à radiação solar proveniente do nascer do sol, contudo nas camadas inferiores (i.e. h1, h2, superficial interior e ambiente interior) a temperatura ainda está a diminuir.
- Às 12h00m regista-se um aumento significativo na temperatura superficial exterior, explicado pelo aumento uniforme da temperatura ambiente exterior, pela radiação solar incidente estar no seu valor máximo sendo ainda aliada à radiação que é refletida na superfície exterior. É de referir a energia armazenada no substrato, absorvida ao longo do dia que pode justificar o aumento das temperaturas nas camadas inferiores (i.e. h1, h2, superficial interior e interior). Contudo, observa-se um aumento superior da temperatura ambiente interior quando comparada às restantes camadas inferiores que pode ser justificado pela impossibilidade de garantia da estanquidade do ar no interior do tabuleiro aquando da montagem das placas de isolamento, favorecendo perdas térmicas adicionais.
- Das 12h00m às 16h00m confirma-se o aumento uniforme da temperatura, em todas as camadas, devido à permanente incidência da radiação solar e ao fato de toda a cobertura estar em equilíbrio pois, neste momento, os ganhos energéticos são iguais em todas as camadas.
- Às 20h00m, as temperaturas superficial e ambiente interiores diminuem ligeiramente, mas as temperaturas na base do substrato (i.e. $Th2,x$ e $Th2^{wi},x$) atingem os seus máximos pois o substrato esteve a armazenar energia durante todo o dia. Por sua vez, a temperatura nas camadas superiores e a temperatura exterior registam uma quebra devido à exposição solar ser praticamente nula. A esta hora o tabuleiro volta a estar em equilíbrio até às 00h00m, onde as temperaturas diminuem uniformemente em todas as camadas, como descrito anteriormente.

Da Figura 4.11 e da Figura 4.12 conclui-se que existem duas alturas do dia onde os tabuleiros se encontram num estado de equilíbrio, em que os ganhos ou perdas são iguais em todas camadas, e também nas zonas interiores e exteriores, correspondendo, respetivamente, ao período das 20h00m às 04h00m e das 12h00m às 16h00m. Também é de notar que existe uma grande amplitude térmica diária nas temperaturas superficiais exteriores e que esta amplitude térmica diminui em profundidade, o que se deve ao efeito de inércia térmica da solução de cobertura verde. Contudo, as temperaturas superficial e ambiente interiores apresentam maior amplitude térmica que o substrato comprovando a existência de frinchas na envolvente, provocando perda de calor por ventilação.

5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

5.1 Conclusões

Neste capítulo serão abordadas as principais conclusões desta dissertação e, por último, propostos desenvolvimentos de trabalhos futuros.

A campanha experimental, desenvolvida no ISA, foi efetuada seguindo a metodologia identificada no capítulo 3 deste documento. Foram monitorizadas, durante a estação de verão de 2015, as temperaturas (i.e. temperaturas ambiente interior e exterior, temperaturas superficiais e temperaturas ao longo da profundidade do solo), a radiação solar, humidades interiores e exterior e os fluxos de calor em quatro tabuleiros com diferentes tipos de vegetação e substrato de forma a poder comparar-se o comportamento térmico com diferentes combinações. No capítulo 3 foi apresentado o caso de estudo e a descrição da campanha de monitorização realizada, enumerando as variáveis de medição e instrumentos de leitura utilizados. No capítulo 4 foram analisados os resultados obtidos da campanha de monitorização e um dia tipo representativo de um dia de verão, chegando-se a algumas conclusões.

No que respeita à comparação dos dois substratos em uso, o substrato S1 tem maior condutibilidade térmica, pois, quando comparado ao tabuleiro com a mesma vegetação apresenta uma temperatura interior, durante o dia, quase 2°C inferior ao tabuleiro com o substrato S2. Isto representa o equivalente a 5% de melhoria de condutividade térmica. Relativamente à constituição de cada substrato, a maior diferença entre eles é a percentagem de matéria orgânica que no substrato S1 é de 73% contra 7% no substrato S2. De acordo com Sailor (2008), uma maior percentagem de matéria orgânica revela um aumento da condutibilidade térmica do mesmo, indo de encontro à conclusão obtida neste estudo. Estes resultados associam-se ao facto de o substrato S1 ser mais argiloso que o substrato S2, arenoso, favorecendo a condutibilidade do primeiro.

Foi possível concluir que o braquipódio, por conseguir manter a sua cor e densidade durante o verão, oferece uma eficiente proteção solar ao possuir coeficientes de absorção solar mais reduzidos. O alecrim e o rosmaninho, por serem plantas de cores mais escuras e por estarem no início do seu desenvolvimento (i.e. serem pouco densas), não se revelaram espécies tão favoráveis para proteger a cobertura verde da radiação solar. Relativamente ao musgo, este não conseguiu ser eficaz na proteção do solo por se encontrar seco, contudo, caso se pretenda a sua utilização, deverá ser garantida a hidratação do mesmo.

Após a realização desta campanha experimental pode afirmar-se que, para além dos constituintes do substrato, o tipo de isolamento térmico e a vegetação escolhida, existem outros parâmetros que influenciam o comportamento térmico de uma cobertura verde: a exposição solar que por sua vez é influenciada pela nebulosidade; e na escolha da vegetação, fatores como a coloração e respetiva densidade. Através dos dados obtidos conclui-se que no presente caso não se verificou influência da rega no comportamento térmico da cobertura com a utilização de um método de administração de água eficiente (e.g. gota-a-gota ou pulverização) com quantidade de água controlada.

Relativamente a períodos em quem ocorre uma redução da temperatura ambiente exterior e uma redução na radiação solar acumulada diária, foi concluído que uma redução de 30% e 40% das mesmas, respetivamente, não provoca alterações significativas no comportamento padrão das temperaturas nas coberturas verdes, sendo apenas verificada uma diminuição proporcional em todas as temperaturas, quer no ambiente interior, superficiais interior e exterior e no solo. Contudo, uma redução desta dimensão na temperatura exterior e na radiação solar acumulada diária, influencia o fluxo de calor que atravessa a cobertura durante o dia, provocando uma redução do mesmo em 60-80% entre as 13h e as 16h, mas não influência o fluxo no período noturno. Associado a estes fatores, ocorreu um aumento médio da humidade relativa interior em cerca de 20%. Com isto pode concluir-se que a temperatura ambiente exterior, acompanhada da radiação solar, provoca alterações nas temperaturas do sistema, variações nos fluxos durante o dia e alterações na humidade relativa interior média.

Na análise do dia mais quente verifica-se que o substrato e a vegetação têm uma contribuição de cerca de 41% na redução dos fluxos de calor que passam pela cobertura verde com isolamento térmico, ao longo do dia. Contudo, no início do período noturno, os valores dos fluxos em ambas as soluções são semelhantes, e ao longo da noite até ao nascer do sol, vai-se notando uma diferença entre as soluções sendo a solução da cobertura com isolamento térmico, substrato e vegetação a mais isolante, pelo que, durante o período diurno, o impacto da mesma é correspondente a uma redução nos valores dos fluxos de calor para metade relativamente a uma solução composta apenas por isolamento térmico.

Através do dia mais quente também foi possível fazer a comparação entre a zona sem e com isolamento, onde foram registados valores cerca de 70% inferiores nos fluxos de calor por se utilizar uma placa de isolamento de poliestireno extrudido com 3cm de espessura: a temperatura superficial interior foi igual à temperatura ambiente interior, na zona com isolamento; e mais próxima à temperatura da altura h2, na zona sem isolamento. Por intermédio do estudo deste dia, foi possível concluir que a sombra provocada pelas plantas nas células da superfície exterior é um fator que pode influenciar os resultados, reduzindo a temperatura. Por fim foi possível concluir que a temperatura superficial exterior tinha grande amplitude térmica diária, sendo que ia diminuindo em profundidade devido à inércia térmica do substrato.

Refira-se que a não garantia de estanqueidade das uniões entre as placas de isolamento térmico utilizadas nas paredes das células teste, apesar da utilização de cintas e do método de travamento, pode ter influenciado a magnitude dos resultados dado que a diferença de temperatura entre ambientes pode não ter sido tão pronunciada como num compartimento real.

No presente caso de estudo foram verificados alguns dos efeitos observados em vários estudos, nomeadamente:

- a diminuição das flutuações térmicas das coberturas verdes (Wong et al., 2003; Liu, 2004; Simmons et al., 2008; Sfakianaki et al., 2009; Sailor et al., 2012; Qin et al., 2012; Dvorak & Volder, 2013; Yang et al., 2015) foi verificada no dia tipo pois o solo, devido à sua inércia térmica, atenuou a temperatura ao longo da espessura;

- o efeito da sombra da vegetação (Niachou et al., 2001; Wong et al., 2003; Schweitzer & Erell, 2014) foi verificado aquando da comparação das temperaturas superficiais, onde o Tabuleiro T5, por conter o musgo seco e baixa densidade vegetal teve temperaturas superficiais mais elevadas quando comparadas às registadas no tabuleiro T3 e T7 que continham uma vegetação mais densa;
- a cor da vegetação/cobertura (Liu & Minor, 2005; Simmons et al., 2008) que ficou demonstrada através da comparação dos dois tabuleiros com vegetações iguais, onde, aquele que possuía cores mais vivas, apresentava menor absortividade e no caso dos restantes dois tabuleiros – ambos mais escuros – as temperaturas superficiais exteriores e absortividade foram superiores;
- a influência do teor de humidade do solo e da evapotranspiração da vegetação (Lazzarin et al., 2005; Sailor et al., 2008; Sfakianaki et al., 2009; Feng et al., 2010; Schweitzer & Erell, 2014; Bevilacqua et al., 2015) foi um dado que não pôde ser confirmado, no sentido em que as temperaturas registadas, para o momento da rega, nos vários tabuleiros, não sofreram alterações.

5.2 Limitações e propostas de desenvolvimentos futuros

Com a realização da campanha experimental observaram-se algumas limitações, como por exemplo a impossibilidade de garantia de estanquidade dos compartimentos, os tipos de substrato e espécies vegetais disponíveis, bem como o tipo e administração de rega em uso.

Registaram-se, também, alguns problemas com os equipamentos como falhas de leitura/ registo por parte do *data logger* Delta-T.

Posto isto, propõe-se a realização de uma análise térmica deste tipo de coberturas durante as estações de inverno e de verão; realizada de forma a poder comparar-se o comportamento de uma cobertura verde em condições extremas de sol, seca e temperaturas elevadas comparativamente a nebulosidade, chuva e temperaturas baixas.

Seria também pertinente um estudo onde se pudesse analisar o comportamento de uma cobertura com diferentes tipos de rega (i.e. com quantidades e formas de administração da mesma diferentes) para saber qual o impacto que esta tem na cobertura.

Por fim, seria relevante a utilização de salas teste em detrimento dos tabuleiros improvisados utilizados, com o objetivo de simular um ambiente o mais próximo da realidade possível.

6. Referências Bibliográficas

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*(56), 300.

Berndtsson, J. C., Bengtsson, L., & Jinno, K. (2009). Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. *Ecological Engineering, 35(3)*, 369-380.

Bevilacqua, P., Coma, J., & Pérez, G. (2015). Plant cover and floristic composition effect on thermal behaviour of extensive green roofs. *Building and Environment, Vol. 92*, 305-316.

Carapeto, A.; Clamote, F.; Portela-Pereira, E.; Cardoso, P.; Gomes, C. ; Canha, P.; Farminhão, J.; Araújo, P. (2015). *Lavandula stoechas L. subsp. stoechas - mapa de distribuição*. Retrieved Julho 25, 2015, from Flora-On: Flora de Portugal Interactiva, Sociedade Portuguesa de Botânica: http://www.flora-on.pt/#wLavandula+stoechas+subsp.+stoechas

Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B., & Davison, J. B. (2010). Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings, Vol. 42*, 1582-1591.

Costa, L. M. (2010). *Espaços Verdes Sobre Cobertura, Uma Abordagem Estética e Ética.* Tese de Mestrado, Instituto Superior de Agronomia, Portugal.

Dalley, S. (2013). *The Mystery of the Hanging Garden of Babylon: an elusive World Wonder traced.* Oxford: Oxford University Press.

De Lorme , E. (1996). *Garden Pavilions and the 18th Century French Court.* Suffolk: Antique Collector's Club.

Design for London. (2008). *Living Roofs and Walls, Technical Report: Supporting London Plan Policy.* London: Greater London Authority.

Donnelly, M. (1992). *Architecture in the Scandinavian Countries.* Massachusetts: The MIT Press.

Dvorak, B., & Volder, A. (2013). Rooftop temperature reduction from unirrigated modular green roofs in south-central Texas. *Urban Forestry & Urban Greening, 12(1)*, 28-35.

EcoD. (2010, Fevereiro 25). *Guia da construção verde: Telhados Verdes.* Retrieved Setembro 25, 2015, from EcoDesenvolvimento: http://www.ecodesenvolvimento.org/voceecod/guia-da-construcao-verde-telhados-verdes

EFP. (2015). *About us...* Retrieved Julho 26, 2015, from European Federation of Green Roof Associations: http://www.efb-greenroof.eu/verband/wir/aboutus.html

Farrar, L. (1996). *Gardens of Italy and the Western Provinces of the Roman Empire from the 4th Century BC to the 4th Century AD.* BAR International Series No. 650.

Felipe, L. (2014, Dezembro 8). *Os povos da Mesopotâmia.* Retrieved Julho 28, 2015, from Civilização Mesopotâmica: http://civimesopotamica.blogspot.de/

Feng, C., Meng, Q., & Zhang, Y. (2010). Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy and buildings, 42(6)*, 959-965.

Figueiredo, M. (2015, Maio e Junho). *Edifícios e Energia, Nº99*, pp. 18-22.

Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L., & Principi, P. (2010). Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building and Environment, 45(8)*, 1890-1904.

Flower, W. P. (1937). Mexican Motif: Casa Alvarado. *Bulletin of the Pan American Union, No. 71*, 316-324.

Fundação para a Ciência e da Tecnologia (2015). *The project*. Retrieved Outubro 5, 2015, from NativeScapeGR: http://www.isa.utl.pt/proj/NativeScapeGR/

Gomes, M. G. (2010). *Comportamento térmico de fachadas de dupla pele: Modelação numérica e análise experimental.* Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Portugal.

Goode, P. (1986). *The Oxford Companion to Gardens.* Oxford: Oxford University Press.

Gorse, G. (1983). Genoese Renaissance Villas: A Typological Introduction. *Journal of Garden History, Volume 3, No. 4*, 255-289.

Henry, A., & Frascaria-Lacoste, N. (2012). The green roof dilemma–Discussion of Francis and Lorimer (2011). *Journal of environmental management, 104*, 91-92.

ISA. (2015). *O ISA*. Retrieved Julho 15, 2015, from Instituto Superior de Agronomia: https://www.isa.ulisboa.pt/apresentacao/o-isa

ISA. (2015). *Where is ISA?* Retrieved Julho 15, 2015, from Instituto Superior de Agronomia: http://www.isa.utl.pt/files/pub/fotos/mapa_lisboa.jpg

Jashemski, W. (1979). *The Gardens of Pompeii: Herculaneum and the Villas Destroyed by Vesuvius.* New York: Aristide D. Caragzas, Volume I and II.

Jones, W. (2011). *Air Conditioning Engineering, fifth edition.* Butterworth Heinemann.

Jörg Breuning & Green Roof Service LLC. (2015). *German FLL Guideline for Green Roofs*. Retrieved Julho 26, 2015, from FLL Green Roof Technology: http://www.greenrooftechnology.com/fll-green-roof-guideline

Lanham, J. (2007). *Thermal Performance of Green Roofs in Cold Climates.* Dissertação de Mestrado, Queen's University, Canada.

Lazzarin, R., Castellotti, F., & Busato, F. (2005). Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings, 37(12)*, 1260-1267.

Liu, K. (2004). *Engineering performance of rooftop gardens through field evaluation.* Ottawa: National Research Council, Institute for Research in Construction.

Liu, K., & Minor, K. (2005). Performance evaluation of an extensive green roof. *Presentation at Green Rooftops for Sustainable Communities, Washington DC*, 1-11.

Mather, J. (1958). Preface. *Centerton*, 247-248.

Midden, K., Groninger, J., Therrell, M., & Magill, J. (2011). *A History and Definition of Green Roof Technology with Recommendations for Future Research.* Carbondale: Southern Illinois University.

Miller, L. (2008). *Green Roof Policy: A Sustainable Space to Grow?.* Dissertação de Mestrado, TUFTS University, Massachusetts, EUA.

Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., & Mihalakakou, G. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and buildings, 33(7)*, 719-729.

NWEI. (2015). *Sustainable Living & Education*. Retrieved Setembro 25, 2015, from Northwest Earth Institute: http://www.nwei.org/our-model-for-change/

O'Reilly, J. (2010). In I. Atherton, S. Bosanquet, & M. Lawley (Eds.), *Mosses and Liverworts of Britain and Ireland a field guide* (p. 438). British Bryological Society.

Oberndorfer, E.; Lundholm, J.; Bass, B.; Coffman, R. ; Dunnett, N.; Stuart, G.; Gaffin, S.; Köhler, M.; Liu, K (2007). Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *BioScience, 57(10)*, pp. 823-833.

Peck, S., Callaghan, C., & Kuhn, M. (1999). *Greenbacks from Green Roofs: Forging a New Industry in Canada.* Canada: Canada Mortgage and Housing Corporation.

Pieper, J. (1987, March 15). The Nature of Hanging Gardens. *Daidalos #23*, pp. 94-109.

Porto, M.; Carapeto, A.; Clamote, F.; Araújo, P.V.; Pereira, A.; Almeida, J.; Marabuto, E.; Pereira, P.; et al. (2015). *Rosmarinus officinalis L. - mapa de distribuição*. Retrieved Julho 25, 2015, from Flora-On: Flora de Portugal Interactiva, Sociedade Portuguesa de Botânica: http://www.flora-on.pt/#wRosmarinus+officinalis

Porto, M.; Portela-Pereira, E.; Caraça, R.; Carapeto, A.; Pereira, A.; Ribeiro, S.; Almeida, J.; Pereira, P.; et al. (2015). *Brachypodium phoenicoides (L.) Roem. & Schult. - mapa de distribuição*. Retrieved Julho 25, 2015, from Flora-On: Flora de Portugal Interactiva, Sociedade Portuguesa de Botânica: http://www.flora-on.pt/#wBrachypodium+phoenicoides

Qin, X., Wu, X., Chiew, Y. M., & Li, Y. (2012). A Green roof test bed for stormwater management and reduction of urban heat island effect in Singapore. *British J. Environ. Climate Change, 2(4)*, 410-420.

Raji, B., Tenpierik, M. J., & Dobbelsteen, A. V. (2015, Maio). The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45*, pp. 610-623. Retrieved Agosto 20, 2015, from http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115000994

Robinson, A. (2013, Setembro 19). Finding Babylon's Gardens at Nineveh. *Current World Archaeology*, *60*, pp. 58-59.

Sailor, D. J., Elley, T. B., & Gibson, M. (2012, April). Exploring the building energy impacts of green roof design decisions–a modeling study of buildings in four distinct climates. *Journal of Building Physics, Vol.35, Nº 4, 372-391*.

Sailor, D. J., Hutchinson, D., & Bokovoy, L. (2008). Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western US. *Energy and Buildings, 40(7)*, 1246-1251.

Santamouris, P., Pavlou, C., Doukas, P., Mihalakakou, G., Synnefa, A., Hatzibiros, A., & Patargias, P. (2007). Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece. *Energy, 32(9)*, 1781-1788.

Schweitzer, O., & Erell, E. (2014). Evaluation of the energy performance and irrigation requirements of extensive green roofs in a water-scarce Mediterranean climate. *Energy and Buildings, 68*, 25-32.

Secrets Of The Ancients - Hanging Gardens Of Babylon (1999). [Motion Picture]. BBC & History Channel.

Sfakianaki, A., Pagalou, E., Pavlou, K., Santamouris, M., & Assimakopoulos, M. N. (2009). Theoretical and experimental analysis of the thermal behaviour of a green roof system installed in two residential buildings in Athens, Greece. *International Journal of Energy Research 33(12)*, 1059-1069.

Silva, R. (2013). *Tema3 -Introdução à radiação solar.* Retrieved Setembro 23, 2015, from EBAH: http://www.ebah.pt/content/ABAAABTOoAB/tema3-introducao-a-radiacao-solar

Silveira de Borba, A. E. (2012, Fevereiro 7). *A qualidade do solo de uma horta.* Retrieved August 5, 2015, from Universidade dos Açores - Departamento de Ciências Agrárias: http://www.dca.uac.pt/noticia/a_qualidade_do_solo_de_uma_horta

Simbiótica. (2015, Setembro 25). *Impacto do Homem sobre o Ambiente*. Retrieved from Simbiótica.org: http://simbiotica.org/impacto.htm

Simmons, M. T., Gardiner, B., Windhager, S., & Tinsley, J. (2008). Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosystems, 11(4)*, 339-348.

Simões, E. J. (2012). *Integração do elemento vegetal no edificado.* Dissertação de mestrado não-publicada, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Portugal.

Souza, L. (2011). *O que é o Smog?* Retrieved Setembro 25, 2015, from Mundo Educação: http://www.mundoeducacao.com/quimica/o-que-smog.htm

Stater, D. (2008). *Green Roofs: Sustainability from the top down.* California, EUA: University of California.

Titova, N. (1990, Setembro-Outubro). Rooftop Gardens. *Science in the USSR, No. 5*, pp. 20-25.

Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. (2015). *Espécie Brachypodium Phoenicoides*. Retrieved Julho 25, 2015, from Jardim Botânico UTAD: http://jb.utad.pt/especie/brachypodium_phoenicoides

Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. (2015). *Espécie Lavandula stoechas*. Retrieved Julho 25, 2015, from Jardim Botânico UTAD: http://jb.utad.pt/especie/lavandula_stoechas

Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. (2015). *Espécie Rosmarinus Officinalis*. Retrieved Julho 25, 2015, from Jardim Botânico UTAD: http://jb.utad.pt/especie/rosmarinus_officinalis

Wark, C., & Wark, W. (2003). Green Roof Specifications and Standards – Establishing an emerging technology. *The Construction Specifier, Vol.56, Nº8,* 1-12.

Wong, N. H., Chen, Y., Ong, C. L., & Sia, A. (2003). Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment, 38(2)*, 261-270.

Yang, W., Wang, Z., Cui, J., Zhu, Z., & Zhao, X. (2015). Comparative study of the thermal performance of the novel green (planting) roofs against other existing roofs. *Sustainable Cities and Society, 16*, 1-12.