

Estudo Experimental do Comportamento Térmico de Coberturas Verdes Semi-Intensivas

Diogo André Ferreira Neves

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores

Prof.^a Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes
Prof.^a Doutora Maria Cristina de Oliveira Matos Silva

Júri

Presidente: Prof. Doutor Nuno Gonçalo Cordeiro Marques de Almeida
Orientadora: Prof.^a Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes
Vogal: Prof. Doutor António Heleno Domingues Moret Rodrigues

Maio de 2017

Agradecimentos

Esta dissertação só foi possível devido à intervenção de várias pessoas e entidades que me auxiliaram no seu desenvolvimento.

Foi com muito agrado que trabalhei com a Prof.^a Maria da Glória Gomes e com a Prof.^a Cristina Matos Silva. Quero-lhes agradecer por me terem orientado neste trabalho, pela disponibilidade e pelos esclarecimentos que me permitiram enriquecer este trabalho.

Ao Instituto Superior Técnico e ao Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, por terem dado formação académica e pela disponibilidade dos equipamentos para a realização das campanhas experimentais.

Ao Instituto Superior de Agronomia, agradeço a cedência do espaço e dos tabuleiros para a realização da campanha experimental e à Prof.^a Teresa Paço pela disponibilidade e divulgação de informação necessária.

Ao colega Ricardo Laranjeira que me auxiliou na montagem dos compartimentos e no transporte e instalação dos equipamentos de monitorização.

Por último quero agradecer a participação indireta da minha família, amigos e colegas que me apoiaram durante todo este percurso.

Resumo

A utilização de coberturas verdes como solução construtiva em novos edifícios tem-se tornado cada vez mais apelativa. São reconhecidos vários benefícios ambientais em zonas urbanas, onde as áreas permeáveis e com vegetação são tendencialmente mais reduzidas, no entanto, o seu desempenho térmico não ainda bem conhecido. É importante estudar este desempenho para que a construção seja sustentável em termos energéticos. Os substratos e vegetação são componentes essenciais para o desempenho destas soluções pelo que devem ser estudados com vista à otimização destas soluções. Com o intuito de estudar o impacto do tipo de substrato e vegetação no comportamento térmico de coberturas verdes, foram montados, no Instituto Superior de Agronomia, modelos reduzidos de coberturas verdes, com vegetações e substratos diferentes, utilizando tabuleiros originalmente do projeto NativeScapeGR. Foram monitorizadas temperaturas ambiente e superficiais, quer interiores quer exteriores, e do solo a diferentes cotas, radiação solar, fluxos de calor e humidade relativa para duas campanhas experimentais, inverno e verão. Verificou-se que, no inverno, a vegetação densa dificultou as perdas de calor e diminuiu os ganhos solares, sendo mais benéfica do que vegetação menos densa. No verão, a vegetação mais densa também é mais benéfica, embora que neste caso seja por permitir um maior efeito de sombreamento, que diminuiu os ganhos solares com consequência na temperatura ambiente interior. As coberturas demonstraram ser mais eficientes no verão se forem mantidas boas condições da sua utilização.

Palavras-chave: coberturas verdes semi-intensivas; desempenho térmico; transmissão de calor; comportamento térmico; clima mediterrâneo

Abstract

The use of green roofs in new buildings has been getting more attention. There are many known environmental benefits to its use in urban zones, where permeable areas with vegetation are usually almost inexistent, however its thermal performance is not yet that well known. It's important to understand how green roofs behave in order to design more environmental and energy sustainable buildings. Vegetation and substrate are important distinguishing elements that influence the behavior of green roofs. In order to study and optimize green roofs, there were assembled, in Instituto Superior de Agronomia, models of semi-intensive green roofs, with different vegetation and substrate types, originally built for the project NativeScapeGR. The variables that were monitored in the experimental campaign are: indoor, outdoor, surface temperatures, and along the growth medium, solar radiation, heat flux and relative humidity for two seasons, winter and summer. In the winter, denser vegetation reduced the heat loss but it also reduced solar gains, however they weren't very significant. In the summer, denser vegetation yielded more benefits by reducing the amount of solar radiation that was absorbed by the substrate, from shading effects, and by evapotranspiration, preventing the indoor from overheating.

Keywords: semi-intensive green roofs; thermal performance; heat transmission; thermal behavior; Mediterranean climate

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização do documento.....	2
2	Estado da arte	5
2.1	Enquadramento histórico	5
2.2	Caracterização das coberturas verdes	7
2.2.1	Constituição das coberturas	7
2.2.2	Vantagens e desvantagens	8
2.3	Desempenho térmico de coberturas verdes	10
2.3.1	Climas frios	10
2.3.2	Climas tropicais	12
2.3.3	Climas mediterrâneos.....	15
3	Caso de estudo	19
3.1	Amostra.....	19
3.1.1	Localização.....	19
3.1.2	Caracterização dos tabuleiros	20
3.2	Procedimento experimental	27
4	Análise e discussão de resultados	33
4.1	Descrição da análise.....	33
4.2	Campanha de inverno (estação de aquecimento).....	36
4.2.1	Resultados gerais da campanha	36
4.2.2	Dia de menor radiação solar (D<RS)	43
4.2.3	Dia mais frio (D+F)	50
4.3	Campanha de verão (estação de arrefecimento)	57
4.3.1	Resultados gerais da campanha	57
4.3.2	Dia mais quente (D+Q).....	65
5	Conclusões e desenvolvimentos futuros	71
5.1	Conclusões	71
5.2	Limitações e desenvolvimentos futuros	72

Índice de figuras

Figura 2.1 - Esquema das diferentes camadas da solução da cobertura verde (Vijayaraghavan, 2015)	7
Figura 3.1 - Mapas da localização do ISA/Tapada da Ajuda e do herbário na Tapada (ISA, 2016)	19
Figura 3.2 - Vista aérea do herbário, localização e orientação dos tabuleiros	20
Figura 3.3 - Pormenores dos compartimentos	20
Figura 3.4 - Desenhos esquemáticos dos tabuleiros [mm] (Meneses, 2015)	21
Figura 3.5 - Detalhe do perfil dos tabuleiros [mm] (Meneses, 2015)	22
Figura 3.6 - <i>Brachypodium Phoenicoides</i> (Braquipódio)	23
Figura 3.7 - <i>Lavandula Luisieri</i> (Rosmaninho)	24
Figura 3.8 - <i>Rosmarinus Officinalis</i> (Alecrim)	24
Figura 3.9 - <i>Pleurochaete</i> (Musgo)	25
Figura 3.10 - Tabuleiros (4-Fev-2016)	26
Figura 3.11 - Desenhos de um tabuleiro, com a localização dos sensores. (Meneses, 2015)	28
Figura 3.12 - Detalhes da instalação dos termopares e piranómetro no exterior	29
Figura 3.13 - Sensores no interior dos compartimentos sob os tabuleiros	30
Figura 3.14 - Data loggers	31
Figura 4.1 - Temperatura exterior e interior dos tabuleiros e radiação solar na campanha de inverno	36
Figura 4.2 - Velocidade e direção do vento no IST durante a campanha de inverno (meteoTécnico)	36
Figura 4.3 - Variações de temperatura dos tabuleiros em relação ao tabuleiro de referência da campanha de inverno	38
Figura 4.4 - Fluxos de calor no tabuleiro T5 e T7 nas zonas com e sem isolamento e radiação solar da campanha de inverno	40
Figura 4.5 - Temperaturas e humidade relativa da campanha de inverno	41
Figura 4.6 - Precipitação referente ao mês de fevereiro [mm] (meteoTécnico)	41
Figura 4.7 - Coeficiente de transmissão térmica e precipitação da campanha de inverno	42
Figura 4.8 - Temperaturas de todos os tabuleiros e radiação solar no D<RS	45
Figura 4.9 - Fluxos de calor dos tabuleiros T5 e T7 e radiação solar no D<RS	47
Figura 4.10 - Temperatura do substrato do tabuleiro T7 e radiação solar no D<RS	48
Figura 4.11 - Gradiente de temperatura em profundidade dos tabuleiros no D<RS	50
Figura 4.12 - Temperaturas de todos os tabuleiros e radiação solar no D+F	52
Figura 4.13 - Fluxos de calor dos tabuleiros T5 e T7 e radiação solar no D+F	54
Figura 4.14 - Temperatura do substrato do tabuleiro T7 e radiação solar no D+F	54
Figura 4.15 - Gradiente de temperatura em profundidade dos tabuleiros no D+F	56
Figura 4.16 - Temperatura exterior e interior de todos os tabuleiros e radiação solar na campanha de verão	57
Figura 4.17 - Velocidade e direção do vento no IST durante a campanha de verão (meteoTécnico) .	57

Figura 4.18 - Variações de temperatura dos tabuleiros em relação ao tabuleiro de referência da campanha de verão	59
Figura 4.19 - Fluxos de calor no tabuleiro T5 e T7 nas zonas com e sem isolamento e radiação solar da campanha de verão	61
Figura 4.20 - Temperaturas e humidades relativas da campanha de verão	62
Figura 4.21 - Precipitação referente ao mês de Julho (meteoTécnico)	63
Figura 4.22 - Coeficiente de transmissão térmica e radiação solar na estação de verão	63
Figura 4.23 - Temperaturas de todos os tabuleiros e radiação solar no D+Q	66
Figura 4.24 - Fluxos de calor dos tabuleiros T5 e T7 e radiação solar no D+Q	68
Figura 4.25 - Temperatura do substrato do tabuleiro T7 e radiação solar no D+Q	68
Figura 4.26 - Gradiente de temperatura em profundidade dos tabuleiros no D+Q	70

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Classificação de coberturas verdes de acordo com o tipo de uso, construção e requisitos de manutenção (IGRA, 2012)	8
Tabela 2.2 - Quadro-resumo de estudos anteriores em coberturas verdes em climas frios.	11
Tabela 2.3 - Quadro-resumo de estudos anteriores em coberturas verdes em climas tropicais.	13
Tabela 2.4 - Quadro-resumo de estudos anteriores em coberturas verdes em climas mediterrâneos.	16
Tabela 3.1 - Composição dos substratos (Meneses, 2015).....	22
Tabela 3.2 - Características dos substratos (Meneses, 2015).....	22
Tabela 3.3 - Resumo das características da vegetação (adaptado de Meneses, 2015).....	25
Tabela 3.4 - Composição dos tabuleiros (Meneses, 2015).....	26
Tabela 3.5 - Coeficientes solares dos tabuleiros (Meneses, 2015)	27
Tabela 3.6 - Cotas das células em cada tabuleiro	30
Tabela 3.7 - Equipamento no tabuleiro T3 e T5.....	31
Tabela 4.1 - Valores estatísticos diários e temperatura Ar-Sol média diária na campanha de inverno	43
Tabela 4.2 - Valores máximos, médios e mínimos de temperaturas, fluxos e radiação no D<RS	44
Tabela 4.3 - Valores máximos, médios e mínimos de temperaturas, fluxos e radiação no D+F.....	51
Tabela 4.4 - Valores estatísticos diários e temperatura Ar-Sol diária da campanha de verão.....	64
Tabela 4.5 - Valores máximos, médios e mínimos de temperaturas, fluxos e radiação no D+Q	65

Simbologia

ISA	Instituto Superior de Agronomia	
IST	Instituto Superior Técnico	
ET ₀	Evapotranspiração de referência	
LAI	Índice da área da folha (Leaf Area Index)	
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil	
MO	Matéria orgânica	%
N	Azoto	g/kg
K ₂ O	Óxido de potássio	mg/kg
P ₄ O ₁₀	Pentóxido de fósforo	mg/kg
M _{va}	Massa volúmica aparente	g/cm ³
K _{sat}	Condutibilidade hidráulica saturada	cm/dia
S1	Substrato nº1	
S2	Substrato nº2	
T3	Tabuleiro nº 3	
T5	Tabuleiro nº5	
T6	Tabuleiro nº6	
T7	Tabuleiro nº7	
Wi	Com isolamento (<i>With insulation</i>)	
X	Variável aleatória representativa de cada tabuleiro, $x = [3, 5, 6, 7]$	
Te, _x	Temperatura exterior no tabuleiro x	°C
Tse, _x	Temperatura superficial exterior na zona sem isolamento no tabuleiro x	°C
Tse ^{wi} , _x	Temperatura superficial exterior na zona com isolamento no tabuleiro x	°C
Th1, _x	Temperatura do substrato a meia altura na zona sem isolamento no tabuleiro x	°C
Th1 ^{wi} , _x	Temperatura do substrato a meia altura na zona com isolamento no tabuleiro x	°C
Th2, _x	Temperatura na base do substrato na zona sem isolamento no tabuleiro x	°C
Th2 ^{wi} , _x	Temperatura na base do substrato na zona com isolamento no tabuleiro x	°C
Tsi, _x	Temperatura superficial interior na zona sem isolamento no tabuleiro x	°C
Tsi ^{wi} , _x	Temperatura superficial interior na zona com isolamento no tabuleiro x	°C
Ti, _x	Temperatura interior do tabuleiro x	°C
Fl, _x	Fluxo de calor na zona sem isolamento no tabuleiro x	W/m ²
Fl ^{wi} , _x	Fluxo de calor na zona com isolamento no tabuleiro x	W/m ²
Fl ^{ic} ,7	Fluxo de calor calculado da placa de isolamento térmico do tabuleiro T7	W/m ²
Hi, _x	Humidade relativa interior do tabuleiro x	%
He	Humidade relativa exterior	%
RS	Radiação solar em plano horizontal	W/m ²
R	Rotronic	
T	Tinytag	

D<RS	“Dia de Menor Radiação Solar)	
D+F	“Dia Mais Frio”	
D+Q	“Dia Mais Quente”	
T _{ar-sol}	Temperatura ar-sol	°C
h _{se}	Coeficiente de transferência de calor da superfície exterior	W/m ² °C
α	Absortância	
ρ	Refletância	
τ	Transmitância	
q”	Fluxo de calor	W/m ²
Q	Taxa de transferência de calor por unidade de tempo	W
A	Área da secção	m ²
λ	Condutibilidade térmica do material	W/m°C
e	Espessura	m
dT	Diferença de temperaturas	°C
dx	Espessura do material	m

1 Introdução

Neste capítulo, apresenta-se o tema em estudo, de modo a justificar a necessidade deste trabalho e definir os objetivos do estudo. Por último, apresenta-se também a organização do documento.

1.1 Enquadramento

Desde o início do século XIX que a migração de pessoas do meio rural para o meio urbano tem originado vários problemas de habitabilidade das grandes cidades. A falta de salubridade na via pública e abastecimento de água foi um dos grandes problemas que afetava a saúde pública. Apesar de parecer um problema do passado para cidadãos de países desenvolvidos, o mesmo não se pode dizer de países em desenvolvimento, onde muitas cidades têm sistemas de saneamento básico precários ou até mesmo inexistentes. Muitas cidades têm também problemas de mobilidade, com sistemas de transporte público ineficientes resultando em problemas de poluição, muitas vezes também associados à presença de indústria. A poluição, para além de piorar a qualidade do ar respirável, faz também aumentar a temperatura, criando o efeito de “ilhas de calor” (Wong & Lau, 2013).

As novas cidades procuram soluções para estes problemas de forma a melhorar a qualidade de vida da sua população. A criação de áreas ajardinadas tem trazido benefícios mas em zonas urbanas existem limitações espaciais. A criação de parques verdes, que ocupam muito espaço e que poderiam ser mais rentáveis com construção, e plantação de árvores e jardins na via pública são das soluções mais populares mas muitas vezes não são suficientes para combater os efeitos da poluição. Uma forma de aumentar o espaço verde nas zonas urbanas, sem ocupação adicional do solo, passa por aproveitar espaços que são pouco utilizados, coberturas, para a instalação de espaços verdes, ou seja utilizando a solução de cobertura verde.

A utilização de coberturas verdes como solução construtiva em novos edifícios tem-se tornado cada vez mais apelativa de forma a solucionar os problemas de habitabilidade das cidades. São reconhecidos vários benefícios ambientais em zonas urbanas, onde as áreas permeáveis e com vegetação são tendencialmente mais reduzidas, solucionando também problemas de drenagem pluvial em sistemas de saneamento pouco desenvolvidos.

Existem ainda problemas de eficiência energética na construção, onde as soluções tradicionais têm dificuldades em cumprir os novos regulamentos dos edifícios relativamente ao seu comportamento térmico. Com o objetivo de reduzir os consumos energéticos com climatização, a regulamentação tem imposto limites máximos para a taxa de transmissão de calor para os vários elementos construtivos que constituem a envolvente dos edifícios, como as coberturas. Desta forma torna-se importante estudar e desenvolver novas soluções ou melhorar as existentes. É, então, importante estudar o desempenho térmico das coberturas verdes e os fatores que o influenciam. Estes sistemas de coberturas constituem um bom isolamento térmico, com benefícios nas diversas estações do ano. No verão estas criam uma barreira aos ganhos solares, por via da absorção da radiação pela vegetação impedindo que atinja a superfície e pela evapotranspiração, e no inverno dificultam a perda de calor

pela cobertura. Estes fatores possibilitam a redução de energia utilizada na climatização dos ambientes interiores (Liu, 2004).

Aliando os benefícios ambientais da utilização destas soluções com vegetação à redução do consumo de energia, frequentemente obtida a partir de fontes fósseis e não renováveis, poderão ser atingidos níveis de sustentabilidade otimizados para a construção urbana.

Nesta dissertação pretendeu-se essencialmente estudar a influência da vegetação das coberturas verdes e também quais são as contribuições do substrato para o desempenho das coberturas verdes em clima mediterrânico.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é avaliar o desempenho térmico das coberturas verdes semi-intensivas em clima mediterrânico. Para isso monitorizou-se o comportamento térmico de modelos reduzidos de coberturas verdes originalmente efetuados para o projeto NativeScapeGR (FCT, 2015), para estudar a otimização de água na manutenção da vegetação em coberturas ajardinadas. Estes modelos reduzidos (tabuleiros) estão instalados no Instituto Superior de Agronomia, em Lisboa, tendo-se realizado algumas alterações no âmbito do presente trabalho de modo a individualizar as zonas inferiores aos tabuleiros e se poder comparar soluções de cobertura verde com e sem isolamento térmico.

A análise deste trabalho experimental foi feita para duas estações do ano, inverno e verão, e consiste em:

- Avaliar a influência das espécies de vegetação que colonizam as coberturas;
- Comparar o desempenho térmico de diferentes tipos de solos e substratos;
- Comparar o desempenho térmico de coberturas verdes com e sem isolamento;
- Identificar outros fatores que influenciem o desempenho térmico de coberturas verdes;
- Avaliar o desempenho térmico destas soluções em situação extremas (e.g. dia mais frio, mais quente e/ou de maior radiação).

1.3 Organização do documento

A organização deste documento foi conseguida dividindo o trabalho em cinco capítulos: Introdução, Estado da arte, Caso de estudo, Análise e discussão de resultados e Conclusões e desenvolvimentos futuros. Posteriormente estão listadas as referências citadas no documento.

Neste primeiro capítulo é feita uma apresentação e enquadramento do tema, dos objetivos do trabalho e a sua organização.

No segundo capítulo estuda-se a origem das coberturas verdes, com uma breve introdução histórica, e fez-se também um levantamento dos estudos realizados sobre o desempenho térmico das coberturas verdes divididos nos climas em que foram estudados.

Em terceiro lugar apresenta-se o capítulo que demonstra o caso de estudo, descrevendo a localização, as características e constituição dos tabuleiros seguido da metodologia utilizada nos processos de criação dos compartimentos e instalação dos equipamentos de recolha de dados.

O capítulo quatro inicia-se com uma descrição da análise feita para ambas as campanhas de recolha de dados realizadas. É feita a apresentação e análise dos resultados separadamente para as campanhas de inverno e verão, em subcapítulos distintos.

O último capítulo reúne as conclusões retiradas a partir da análise efetuada e comparando com os estudos mencionados no estado da arte. Foram também enunciados algumas dificuldades sentidas que devem ser tidas em conta em desenvolvimentos futuros.

2 Estado da arte

Neste capítulo será realizada uma introdução histórica sobre a utilização de coberturas verdes e serão enumeradas as principais vantagens e desvantagens da sua utilização. Especial atenção será dada a estudos anteriores sobre o comportamento térmico deste tipo de solução e esses estudos serão referenciados e resumidos de acordo com o clima em que foram testados.

2.1 Enquadramento histórico

Uma das primeiras referências à utilização de coberturas verdes foram os Jardins Suspensos da Babilónia que foram classificados como uma das sete maravilhas do mundo antigo. Apesar de se apontar que os jardins existiram em 600 a.C., durante o reinado do Nebuchadnezzar II, junto ao rio Eufrates, não foram encontrados ainda vestígios arqueológicos que comprovem a sua existência, referindo-se as escavações arqueológicas de Robert Koldewer e da sua equipa, entre 1898 e 1917, que não obtiveram resultados que provassem a existência dos jardins (Robinson, 2013).

Durante o mesmo período existiam também construções Islandesas e Norueguesas que utilizavam mantos de substrato e vegetação dos terrenos adjacentes nas suas coberturas sobre uma camada de impermeabilização de cascas de bétula, os designados “sod roofs”. Estas coberturas, também utilizadas pelos vikings, ainda se mantêm na tradicional construção desses países de baixas temperaturas pelas suas características de durabilidade e eficiência térmica (Stater, 2008).

Durante vários séculos foram também utilizados jardins em coberturas para adornar palácios e outros edifícios importantes. Embora estejam associados a esta solução benefícios térmicos e ambientais, o principal objetivo da sua utilização era essencialmente decorativo.

Os sistemas mais recentes de coberturas verdes foram desenvolvidos na Alemanha. No final do século XIX as coberturas dos edifícios alemães de classe baixa eram revestidas essencialmente por misturas betuminosas que, por serem inflamáveis, conferia a estas estruturas riscos de incêndio muito elevados. Para melhorar a sua segurança, H. Koch, empreiteiro, juntou areia e gravilha à mistura que ficou também contaminada com sementes, que, ao germinarem, deram origem às coberturas verdes (Miller, 2008).

Com o avanço tecnológico no século XX, desde o desenvolvimento de soluções com melhor desempenho estrutural, que permitiam sobrecargas mais elevadas, a novos materiais que permitiam fazer a impermeabilização das coberturas, verificou-se um aumento significativo no uso de coberturas verdes em novos edifícios (Figueiredo, 2015). Estas técnicas começaram a ser aplicadas a mais tipos de edifícios, tendo até tido utilização militar, de forma a proteger e dificultar a deteção de abrigos anti-bomba e outras infraestruturas que necessitassem de camuflagem. Dos aeródromos militares propagaram-se a aeroportos civis, que os utilizavam mais devido ao seu nível estético, tendência que se fez sentir em particular no norte da Europa em meados do século XX (Titova, 1990), estendendo-se também a outros tipos de edifícios com o objetivo de melhorar a qualidade do ambiente urbano.

Estas soluções começaram a ser alvo de investigação a partir da década de 60 do século passado, principalmente na Alemanha e Suíça, que foram também os países que mais as adotaram, com estudos de avaliação da constituição das coberturas e do seu desempenho. Assim foram

investigados e desenvolvidos novos produtos que pudessem melhorar o desempenho e durabilidade destes sistemas, como membranas anti-raiz e impermeabilizantes, sistemas de drenagem, substratos e vegetação (Midden et al., 2011).

Estes estudos levaram inclusivamente à criação de uma sociedade com diretrizes para as coberturas verdes, a FLL (*Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau* – Sociedade Alemã de Pesquisa, Desenvolvimento e Construção da Paisagem, em português). Estas diretrizes são normalmente utilizadas na Europa tendo sido recentemente também utilizadas nos Estados Unidos da América.

Foi também criada, em 1997, a Federação Europeia de Associações de coberturas verdes (EFB – *Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung*, no original em Alemão) pela Alemanha, Áustria e Suíça para promover a utilização de coberturas e fachadas verdes na Europa. Desde então a federação tem crescido com contribuição das associações de outros países europeus (EFB, 2015).

Estas coberturas têm sido impulsionadas por governos e municípios em todo o mundo, com benefícios fiscais e económicos, desde subsídios a taxas reduzidas. Refiram-se alguns exemplos, Copenhaga, Munique, Portland e Singapura (IGRA, 2012). Em Munique foram implementadas várias medidas, como nova regulamentação no planeamento urbano e redução de taxas de saneamento de águas pluviais. Os novos edifícios a construir em Copenhaga com as coberturas com inclinações inferiores a 30º têm obrigatoriamente de implementar um sistema de cobertura verde quando não existirem razões estruturais que o impeçam. Os sistemas de drenagem de águas pluviais de Portland estão sobrecarregados e, por isso, a cidade atribui fundos e benefícios fiscais e promove eventos para fazer a integração de coberturas verdes na cidade e solucionar o seu problema. Singapura tem a ambiciosa meta de 50 hectares de áreas verdes em arranha-céus até 2030. Para tal, desenvolveu um programa para as implementar em novos edifícios e em edifícios existentes.

Em Portugal ainda não foi implementada regulamentação que determinasse a implementação de coberturas verdes nem foram criados benefícios económicos para incentivar a sua utilização. Ainda assim, a sua utilização começa a ter algum destaque. Os jardins da Fundação Calouste Gulbenkian são, em grande parte, coberturas de edifícios enterrados, demonstrando a fácil integração com o ambiente. Estas coberturas também foram adotadas em alguns edifícios de serviços como a ETAR de Alcântara, em Lisboa, e a estação de metro da Trindade, no Porto. Uma vez que, no nosso país, o mercado ainda não está totalmente familiarizado, as empresas ZinCo e Landlab, especialistas na área, colaboraram em projetos de grandes dimensões fora do país referindo-se como exemplo os projetos da High Line de Nova Iorque, nos EUA, do Centro Tecnológico de Munique, na Alemanha, e da UWC Dilijan College, na Arménia (ANCV, 2015).

Pelo exposto, pode concluir-se que as coberturas verdes não são uma solução recente, sendo conhecidos exemplos desde 600 a.C. e desde essa altura já se conheciam os seus benefícios térmicos, mas eram principalmente utilizadas pelos seus efeitos estéticos por serem opções muito onerosas na altura. Com o desenvolvimento da tecnologia de coberturas verdes na construção foi possível melhorar o seu desempenho e utilizá-las com mais frequência, solucionando diversos problemas das zonas urbanas.

2.2 Caracterização das coberturas verdes

2.2.1 Constituição das coberturas

Uma cobertura verde é uma solução de cobertura de edifício caracterizada por ter vegetação. Para isso ser possível, é necessário existir uma camada de substrato onde as plantas possam crescer. Existem ainda outras camadas para prevenir anomalias no edifício e também vários modelos para a sequência de camadas, enunciando-se de seguida as camadas de utilização mais comum.

Com a vegetação e o substrato a formar as camadas mais superficiais, as seguintes camadas inferiores são colocadas para prevenção de anomalias que estas possam causar. Como as plantas necessitam de água para sobreviver, este local fica propício à permanência de água. Para evitar anomalias pela presença de água utiliza-se uma camada drenante protegida por um geotêxtil para evitar a passagem de finos. Sob esta camada é colocada uma camada de proteção e uma tela anti-raiz para proteger as camadas inferiores da ação da vegetação.

As restantes camadas são comuns com as de uma solução de cobertura plana tradicional ou invertida. São utilizados isolamento térmico e uma membrana impermeabilizante, sendo a ordem de colocação definida pelo isolamento térmico: caso este seja afetado por água deve ser utilizado sob a membrana impermeabilizante (cobertura tradicional); caso o isolamento térmico não seja afetado por água este pode ser utilizado sobre a membrana de impermeabilização (cobertura invertida).

Na Figura 2.1 apresenta-se um esquema das camadas de uma cobertura verde na ordem de colocação mais comum.

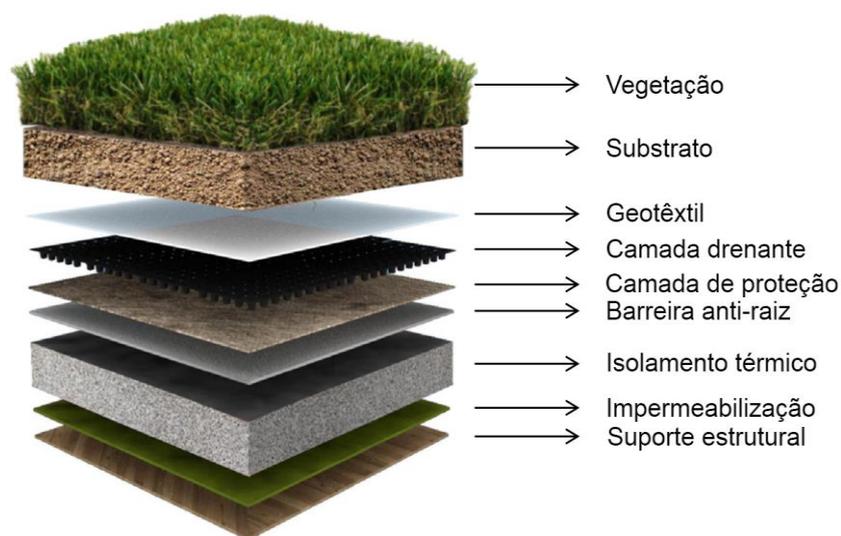


Figura 2.1 - Esquema das diferentes camadas da solução da cobertura verde (Vijayaraghavan, 2015)

Outra forma de classificar coberturas verdes depende da espessura do substrato e da vegetação que o coloniza. Se a vegetação for de maior porte o substrato terá também de ser mais espesso para acomodar as respetivas raízes. As coberturas verdes são geralmente classificadas em: extensivas, semi-intensivas e intensivas (Henry et al., 2012; Wark et al., 2003). Estas categorias podem ter diferentes tipos de acessibilidade e acarretam diferentes custos de manutenção, devidas ao tipo de vegetação.

Uma solução com vegetação rasteira, como relva, necessita de uma camada de substrato com pouca espessura, facilitando a sua implementação em obra. Este tipo de vegetação tem necessidades de manutenção reduzidas e são muitas vezes não acessíveis, por isto são a solução menos dispendiosa (Fioretti et al., 2010).

As coberturas intensivas caracterizam-se por ter vegetação de grande porte, como árvores, e são normalmente acessíveis. A camada de substrato utilizada nesta solução tem de ser superior para garantir a fixação das raízes das plantas. Requerem uma estrutura de suporte mais robusta devido ao maior carregamento por parte do solo e das plantas. Devem ser alvo de manutenção mais cuidada e mais frequente agravando fortemente os custos de operação relacionados com estas coberturas.

Existem ainda as coberturas semi-intensivas que tem plantas de médio porte, como arbustos, estando as suas características entre as mencionadas anteriormente.

Na Tabela 2.1 apresentam-se as características de cada tipo de cobertura com valores de espessura do substrato e o peso de referência para cada tipo de solução.

Tabela 2.1 - Classificação de coberturas verdes de acordo com o tipo de uso, construção e requisitos de manutenção (IGRA, 2012)

	Cobertura verde extensiva	Cobertura verde semi-intensiva	Cobertura verde intensiva
Manutenção	Baixa	Periódica	Alta
Irrigação	Não	Periódica	Regular
Comunidade de plantas	Musgo, <i>sedum</i> , 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

2.2.2 Vantagens e desvantagens

Desde as primeiras utilizações de coberturas verdes que se descobriram alguns dos benefícios que elas podem trazer às construções. Mas as suas vantagens estão muito para além do benefício ao próprio edifício. Existem outras mais-valias da sua utilização em meio urbano, desde o aumento das áreas de infiltração de águas pluviais à melhoria da qualidade do ar. Estas vantagens conhecidas ainda podem ser estudadas de forma a maximizar o seu efeito e podem até ser descobertas novas técnicas que devolvam outros benefícios. Estas soluções são também mais duráveis quando bem executadas.

Ao nível do edifício refira-se o aumento do isolamento térmico e também acústico, ambos relacionados com o aumento da massa da cobertura. (Vijayaraghavan, 2015). A redução da absorção solar e o aumento da inércia térmica, devida à massa, conduzem a menores gastos de energia utilizada na climatização de interiores (Fioretti et al., 2010). A melhoria do comportamento térmico da solução de cobertura verde é também auxiliado pelo efeito de sombreamento por parte da vegetação.

As camadas de vegetação e solo sobre as restantes camadas diminuem as oscilações térmicas das camadas inferiores pelo aumento da inércia térmica. O estudo de Liu (2003) revelou uma diferença

de quase 50°C entre as membranas de coberturas verdes e de coberturas tradicionais. As camadas de impermeabilização beneficiam com esta proteção, mantendo as suas características por mais tempo. Estas camadas de impermeabilização, que se estimam necessitar de substituição a cada década nas coberturas planas tradicionais chegam a ter vidas úteis várias vezes superiores, existindo coberturas verdes com meio século sem dar sinais de problemas com infiltrações (Landlab, 2017).

Os benefícios térmicos das coberturas verdes não se fazem sentir apenas ao nível do edifício. As coberturas verdes permitem diminuir os efeitos de ilhas de calor que acontece nas diversas áreas urbanas com grande densidade em todo o mundo (Wong & Lau, 2013).

Nestas áreas urbanas também se verifica um agravamento da qualidade do ar com o aumento da população. A quantidade de poluentes pesados no ar tem vindo a aumentar mas pode ser mitigada pela adoção de coberturas verdes. A intervenção direta das plantas, que consomem alguns dos gases poluentes, tem um efeito significativo na poluição atmosférica e a melhoria das propriedades térmicas das coberturas verdes tem uma influência indireta, pois ao reduzirem as necessidades de climatização, reduzem o consumo de energia e a emissão de gases com efeito estufa (Vijayaraghavan, 2015).

Nas cidades com grande densidade populacional e de construção existem também problemas de drenagem de águas pluviais por não existirem áreas de infiltração suficientes. As coberturas verdes absorvem e retêm água da chuva prevenindo inundações causadas por se ter ultrapassado as capacidades de escoamento dos sistemas de drenagem pluvial em situações de precipitação intensa (Simmons et al, 2008). As águas da chuva, por vezes ácidas e poluídas, ao atravessarem os substratos que retêm os poluentes e neutralizam a sua acidez (Vijayaraghavan, 2015) melhoraram a sua qualidade afluindo posteriormente para os cursos de água ou se infiltrando-se no solo. Esta água também pode ser aproveitada para uso doméstico e para rega das próprias coberturas verdes.

Esteticamente estas soluções são mais apreciadas do que as coberturas planas tradicionais, oferecendo uma imagem mais natural ao ambiente urbano e também à própria construção. Estas soluções foram historicamente utilizadas como forma decorativa em edifícios importantes e além disso, proporcionam *habitat* à vida selvagem, reduzem o efeito de estufa das cidades, proporcionam estética à paisagem, uma experiência recreativa e, por vezes, cultivo de espécies comestíveis para os habitantes das cidades (Oberndorfer, et al., 2007)

No entanto, apesar de ser uma solução com grandes vantagens, a sua utilização acaba por não ser tão popular por ser uma solução onerosa, quer no momento da instalação quer na sua manutenção. Para além do seu custo da aplicação em obra, desde novas camadas à necessidade de mão-de-obra especializada, podem existir custos superiores para as estruturas que têm de suportar estes componentes. Os sistemas de rega também têm um custo significativo, na sua instalação e na sua manutenção. Esta presença de água constante também pode ser um problema caso existam anomalias na impermeabilização, causando infiltrações no interior do edifício.

Embora os valores associados a esta solução de cobertura verde possam ser bastante elevados e, por vezes, até impedem esta opção por razões orçamentais, os seus benefícios têm um peso muito elevado no ambiente urbano, aproveitando os espaços que têm pouca utilização na maioria das cidades, as coberturas. Assim devolve-se às cidades as áreas verdes que lhes foram retiradas pela construção.

2.3 Desempenho térmico de coberturas verdes

Têm sido realizados vários estudos que permitiram desenvolver as soluções de coberturas verdes modernas que atualmente utilizamos, havendo ainda necessidade de prosseguir com estudos com vista à otimização do seu desempenho. Muitos desses estudos incidiram sobre a componente térmica das coberturas verdes em vários ambientes, que é o objetivo do estudo desta dissertação. Nas Tabelas 2.2 a 2.4 resumem-se as principais investigações, separadas pelo clima em que foram estudadas (i.e. clima frio, tropical e mediterrâneo), onde estão referidas as características dos estudos: tipo de investigação; local e duração; as características da cobertura verde; os parâmetros medidos; e principais conclusões.

2.3.1 Climas frios

A Tabela 2.2 reúne os estudos realizados em climas frios. Liu (2004) fez uma campanha experimental *in situ* durante todas as estações do ano para estudar o comportamento térmico das coberturas verdes; Lanham (2007) simulou invernos rigorosos utilizando um modelo reduzido; e Sailor, et al. (2008; 2011) realizaram dois trabalhos de simulação de referência; e Squier & Davidson (2016) conduziram uma campanha experimental *in situ* durante o inverno e verão.

O estudo de Liu (2004) focou-se na comparação de uma cobertura verde com outra cobertura, na qual a camada exterior era uma tela de impermeabilização auto protegida. O desempenho das coberturas foi avaliado em quatro parâmetros: perfis de temperaturas, flutuações de temperaturas, eficiência energética e águas pluviais. Na análise dos perfis de temperatura verificou-se 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 exteriores superiores a este valor em 3% dos dias enquanto na cobertura de referência esta percentagem foi de 52%. Foi verificada uma redução significativa do fluxo de calor durante o verão, resultando em melhor eficiência energética por parte da cobertura verde, mas o mesmo não aconteceu no inverno, onde os fluxos se mantiveram semelhantes. Nas perdas de calor a redução atingiu apenas um valor de 26%, chegando-se à conclusão que uma cobertura verde é mais eficiente em regiões mais quentes. Relativamente à drenagem de águas pluviais, Liu (2004) verificou que a cobertura verde conseguiu reduzir o volume das águas escoadas em 52% de abril a setembro de 2002.

Lanham (2007) desenvolveu modelos reduzidos de coberturas verdes e um de referência para estudar a quantidade de energia necessária para manter a temperatura do ambiente interior dos mesmos a 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 o substrato não tinha grande influência nas propriedades de isolamento térmico dessas coberturas, sendo as camadas de isolamento térmico o elemento que mais contribui para o aumento da resistência térmica do sistema.

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

Ref.	Experim.	Local e duração	Estação do Ano	Características da cobertura					Parâmetros medidos					Conclusões
				A _{cob}	Isol. Térm.	Tipo de veget.	e _{solo}	Outros	Temp.	Rad. Solar	Fluxo calor	Precip.	Outros	
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.; Tela 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
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)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Condutibilidade de 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. (2011)	-	Houston; Phoenix; Portland; New York	-	1660m ² ; 744m ²	Sim	N.D	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
Squier & Davidson (2016)	In situ	Syracuse, NY de Set. 2013 a Set. 2015	Inverno e verão	5600 m ²	Sim	Sedum	7,6 cm	Laje metálica; Barreira anti vapor; Imperm.; Tela anti-raiz; Drenagem; Solo; Vegetação	Amb.; superf.; solo	Sim	Sim	Sim	Humidade do solo; HR; Vento	Redução nas transferências de calor, limitadas com a utilização de isolamento. Camada de neve acumulada atua como isolamento térmico e proteção atmosférica

Sailor et al. (2008) analisaram oito tipos de solo cujas constituições e teores de humidade diferiam entre si. A condutibilidade térmica sofria alterações com a variação dos constituintes dos solos: ela diminuía quando a relação de agregado/areia era aumentado e quando era diminuída a quantidade de matéria orgânica; e aumentava com o aumento do nível de saturação de água no 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, levando a uma grande absorção de radiação solar. No entanto, esta diminui à medida que a camada superior do solo seca, pois o albedo aumenta

Sailor et al. (2011) observaram que os custos com a climatização diminuiriam com o aumento da espessura da camada de solo e com o aumento do índice de área da folha (LAI). Verificaram que, em climas frios, as coberturas verdes tem melhor desempenho 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 os ganhos solares devido ao sombreamento e, por isso, menores são as necessidades de arrefecimento.

Squier & Davidson (2016) analisaram as temperaturas e fluxos de calor de uma cobertura verde extensiva durante as estações de inverno e verão. Observaram que, no inverno, os fluxos são sempre ascendentes por o ambiente interior ser sempre aquecido e, no verão, os fluxos eram descendentes apenas durante as horas de mais calor. Verificaram uma melhoria significativa das coberturas verdes comparando com as tradicionais quando ambas não têm isolamento, no entanto esta melhoria era limitada quando era utilizado isolamento. A camada de neve acumulada no inverno atuou como uma camada adicional de isolamento térmico protegendo as superfícies das ações climatéricas exteriores.

No geral, verificou-se 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 factores que reduzem a necessidade de arrefecimento de um edifício no verão, enquanto no inverno a camada de isolamento térmico é determinante na manutenção da temperatura do ambiente interior, com o substrato a ter um papel pouco relevante. Concluí-se que as coberturas verdes são mais eficientes em climas mais quentes.

2.3.2 Climas tropicais

A Tabela 2.3 apresenta um levantamento dos estudos de investigação realizadas em climas tropicais com maior relevância. Todos estes trabalhos de investigação foram realizados com recurso a campanhas experimentais *in situ* e as medições mais frequentes foram as temperaturas ambiente, superficiais e dos solos e também a radiação solar.

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

Ref.	Expe rim.	Local e duração	Estação do Ano	Características da cobertura					Parâmetros medidos					Conclusões
				A _{cob}	Isol. Térm.	Tipo de veget.	e _{solo}	Outros	Temp.	Rad Solar	Fluxo calor	Precip.	Outros	
Wong et al. (2003)	In situ	Em Singapura de 25 Out. a 10 Nov. 2001	(clima tropical)	N.D.	-	Coberto vegetal e arbustos	Intensiva	-	Amb.; superf.	-	-	-	HR; velocidade e 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	Outono e Primavera	N.D.	Sim	Coberto vegetal	10cm	Estrutura metálica; Isol. térmico; Tela anti-raiz; Drenagem; Solo; Vegetação	Amb.; superf.; solo	-	-	Sim	Escoamento;	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	N.D.	-	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 radioativas e 9,5% por fotossíntese; penas 1,2% é armazenado pelas plantas e pelo solo
Qin et al. (2012)	In situ	Em Singapura de Jun. 2012 a Jun. 2014	Todas	12m ²	-	Relva e ervas	25cm	Estrutura metálica; seixos; Malha; Filtro; Solo; Vegetação	Amb; solo	Sim	-	Sim	Escoamento; Velocidade do vento; Humidade 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.	-	-	-	Humidade 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)	N.D.	Sim	Sedum	10cm; 20cm	Lage de BA; Camada de nivelamento; Imperm.; Isol. térmico; Argamassa; Tijolo de cimento; Solo; Vegetação	Amb.; superf.; solo	Sim	Sim	-	HR; velocidade 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.

As medições de Wong et al. (2003) permitiram concluir que as temperaturas superficiais do solo da cobertura verde foram significativamente inferiores comparativamente às temperaturas da cobertura de referência. O sombreamento provocado pela vegetação foi o principal fator que conduziu a este fenômeno, estando associado à vegetação mais densa, com LAI superior, valores inferiores temperaturas superficiais. A redução do efeito “ilha de calor” também pôde ser comprovado com este estudo, com temperaturas ambiente, a cerca de um metro da cobertura, a registrar cerca de 4°C de redução de temperatura sobre a cobertura verde em relação à cobertura de referência. 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 configurações, com telhados de albedo reduzido (pretos) e elevado (brancos). Concluíram que as coberturas verdes podem afetar significativamente os perfis de temperatura arrefecendo as camadas superficiais e o ambiente interior em dias quentes. Verificaram também que as coberturas verdes têm capacidade de reter quantidades significativas de águas pluviais, dependendo da pluviosidade e do tipo de cobertura, sendo que quanto maior a intensidade da precipitação, menor é, em média, a capacidade de retenção das coberturas verdes: para precipitações 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 adaptadas ao local geográfico e às necessidades do cliente, tendo em conta que estas podem não ter um comportamento adequado se não tiverem sido projetadas corretamente.

Feng et al. (2010) verificaram também a influência das propriedades do solo e da vegetação nas temperaturas das várias camadas. 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, por desidratação das plantas. Os valores recolhidos também demonstraram que os ganhos de calor na superfície foram 99,1% por radiação solar, e que a convecção não tinha muita relevância, 0,9%. De todo o calor dissipado, 58,4% foi pela evapotranspiração da vegetação e do solo, 30,9% por trocas radiativas e 9,5% pela fotossíntese da vegetação. Apenas 1,2% foi armazenada pelas plantas e pelo solo, ou transferidas para a divisão interior, revelando que os ganhos solares pela cobertura não têm muita influência na temperatura interior.

Qin et al. (2012) estudaram três tabuleiros com 4m² de área cada um, dois deles eram coberturas verdes e outro de referência revestido a tijoleira, onde avaliaram o comportamento térmico e o escoamento pluvial. Estes investigadores concluíram que a cobertura verde pode reduzir a temperatura superficial exterior em 7,3°C e a temperatura ambiente interior em 0,5°C quando comparada com uma cobertura tradicional, durante o período da tarde. Também estudaram um evento de precipitação, com uma intensidade máxima de 1mm/min, concluindo que a cobertura verde permitiu reduzir o pico 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 as coberturas verdes reduzem significativamente as temperaturas das

membranas de impermeabilização comparadas com as coberturas planas tradicionais, sem recurso a rega, aumentando assim a vida útil das telas de impermeabilização. Para estes tabuleiros, verificou-se redução de 50°C para 17°C na amplitude térmica registada nas membranas de impermeabilização, na superfície convencional e na base do substrato da cobertura verde, respetivamente.

Yang et al. (2015) compararam duas coberturas verdes (com espessuras de 10cm e 20cm) a três coberturas planas, das quais uma exposta, uma com enchimento cerâmico e outra com enchimento de argila. As temperaturas interiores registadas foram 0,9-1,0°C inferiores 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. A comparação entre as duas coberturas verdes, permitiu concluir que uma maior espessura traduz-se numa maior capacidade de armazenamento de calor. Contudo não consideraram que o ganho energético interior fosse significativo.

Os estudos realizados em climas tropicais tiveram conclusões semelhantes a observações realizadas em climas frios: as coberturas verdes atingem temperaturas inferiores às temperaturas das coberturas tradicionais, com a vegetação a ter um papel de elevada relevância neste fenómeno. Por estarem localizadas em zonas húmidas concluiu-se que as coberturas verdes são eficientes sem rega constante e sem precipitação. Foi também possível provar que as coberturas verdes são uma forma eficiente de mitigar o efeito de “ilha de calor” que se faz sentir em grandes meios urbanos. A sua utilização provou-se benéfica para o desempenho das membranas de impermeabilização, que se degradam quando submetidas a grandes variações de temperatura, mantendo a temperaturas reduzidas. Existiu retenção das águas pluviais nos períodos de precipitação, com retenções superiores para aguaceiros fracos e retenções mais reduzidas para situações de chuvas intensas, à semelhança do registado nos climas frios.

2.3.3 Climas mediterrâneos

Na Tabela 2.4 resumem-se os trabalhos mais relevantes efetuados em climas mediterrâneos. A maioria das campanhas experimentais realizadas foi feita no verão e os parâmetros medidos foram as temperaturas ambiente, superficiais e ao longo da profundidade do solo, radiação solar e, também, a precipitação. Enquanto Schweitzer & Erell (2014) utilizaram um modelo reduzido, com o intuito de perceber a importância das características da vegetação, os restantes estudos utilizaram campanhas *in situ*.

Niachou et al. (2001) concluíram que a temperatura da superfície do solo é influenciada pelo tipo de vegetação que o coloniza, com vegetações mais densas a gerarem temperaturas superficiais inferiores às das zonas em que a vegetação tem densidade mais reduzida, e sempre inferiores a coberturas tradicionais. As temperaturas de ambiente interior em edifícios com cobertura verde mantiveram-se com valores mais reduzidos, mantendo-se inferiores a 30°C. Os fluxos de calor medidos permitiram concluir que as coberturas verdes são mais eficientes do que as coberturas tradicionais, quando não é utilizado isolamento térmico. No entanto, se for utilizado isolamento térmico, a eficiência térmica de ambas as soluções (com e sem cobertura verde) é muito semelhante com diferenças muito reduzidas a favor das coberturas verdes. Estas diferenças levaram a ganhos energéticos de 37-48% nas coberturas sem isolamento térmico e ganhos de 2% quando existe isolamento térmico.

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

Ref.	Experim.	Local e duração	Estação do Ano	Características da cobertura					Parâmetros medidos					Conclusões
				A _{cob}	Isol. Térm.	Tipo de veget.	e _{solo}	Outros	Temp.	Rad Solar	Fluxo calor	Precip.	Outros	
Niachou et al. (2001)	In situ	Em Loutraki, Greece de 30 Jun. a 17 Ago. 2000	Verão	N.D.	Sim	N.D.	N.D.	-	Amb.; superf.; solo	-	Sim	-	HR; Condições de conforto térmico	Numa cobertura sem isol. térmico, o fluxo de calor é 6-16W/m ² °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	Inverno e Verão	1000m ²	Sim	N.D.	20cm	Laje BA; Imperm.; Isol. térmico; Drenagem; Solo; Vegetação	Amb; superf.; solo	Sim	-	Acumulada	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	Primavera	100m ²	Sim	Ervas, Arbustos e Árvores	N.D.	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	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	Extensivo	Geotêxtil; Drenagem; Isolamento; Imperm; Cim. poroso; Substrato; Vegetação	Amb.; superficial; 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
Silva et al. (2016)	In situ	Lisboa, Portugal	Inverno e Verão	17,2m ²	Não	Relva	25cm	Laje BA; Drenagem; Gravelha; Geotêxtil; Solo; Vegetação	Amb.; superf.	Sim	Sim	-	Humidade relativa interior e exterior	Necessidades de aquecimento igual para os três tipos de cobertura verde; necessidades de arrefecimento das coberturas semi-intensivas e intensivas é 36% e 17% das coberturas extensivas; coberturas verdes mais eficientes que as tradicionais brancas e pretas.

As modelações realizadas por Lazzarin et al. (2005) permitiram comprovar a importância da evapotranspiração nos processos de arrefecimento das coberturas verdes. No verão, em períodos em que o solo estava seco, verificou-se uma redução do fluxo de calor, descendente, em cerca de 60% em relação às coberturas tradicionais. Com o solo húmido, os fluxos de calor não só se anularam como passaram a ser ascendentes. Os processos de evapotranspiração contribuíram para o arrefecimento do solo e das várias camadas da cobertura.

Através de modelos teóricos, Sfakianaki et al. (2009) verificaram que as coberturas verdes têm contribuições muito reduzidas para as cargas térmicas dos edifícios com isolamento térmico, apresentando uma melhoria de 2% a 5%. Comprovaram também que a vegetação das coberturas atuava como uma camada adicional de isolamento, reduzindo as perdas de calor pela cobertura, no inverno e no verão. A humidade do solo e a presença de água na cobertura levou a aumentos da condutibilidade térmica, conduzindo a perdas de calor superiores. No verão, as reduções das temperaturas ambiente interiores foram muito reduzidas, e no inverno, o aumento de temperatura foi ligeiramente superior. Ainda assim, verificou-se uma redução de 11% nas necessidades de climatização de edifícios com isolamento térmico.

Schweitzer e Erell (2014) investigaram a influência das características da vegetação escolhida no desempenho térmico das coberturas verdes. No seu estudo, identificaram três aspetos fundamentais: o efeito de sombreamento, a importância das plantas e a influência do vento, no consumo de água para rega da vegetação. Numa cobertura extensiva, o efeito de sombreamento das plantas é o principal motivo pelo qual a temperatura ambiente interior diminui, no verão, durante as horas mais quentes, evitando que grande parte da radiação solar atinja o solo. Uma cobertura extensiva tem uma capacidade maior de dissipação de calor, devido à evapotranspiração e ao sombreamento por parte das plantas, do que uma cobertura com apenas solo saturada de água. Nos períodos sem precipitação, concluem que é necessário fazer rega, para manter a vegetação viva e para hidratar o solo para manter a eficiência das coberturas verdes.

Durante dois anos, Bevilacqua et al. (2015) estudaram o efeito da vegetação e das suas características no desempenho 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 da 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 deste estudo foi que 8cm de espessura 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 influencia diretamente as temperaturas do substrato e a composição vegetativa.

Silva et al. (2016) realizaram duas campanhas experimentais, inverno e verão, em Lisboa, para calibrar simulações no programa *Energy Plus*. O modelo foi utilizado para comparar os diferentes tipos de cobertura verde, extensiva, semi-intensiva e intensiva. Foram avaliadas as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento dos três tipos de cobertura verde e comparados com coberturas tradicionais pretas e brancas. Verificou-se que as necessidades de aquecimento eram muito

semelhantes entre os três tipos de cobertura verde, mas as necessidades de arrefecimento de coberturas verdes semi-intensivas e intensivas era cerca de 36% e 17% das coberturas verdes extensivas. Concluiu-se também que as coberturas verdes semi-intensivas e intensivas requerem menores quantidades de energia do que coberturas tradicionais (pretas e brancas). Para baixos níveis de isolamento térmico as soluções de cobertura verde extensiva apresenta reduções de 20% enquanto em níveis elevados não aparenta ter benefícios energéticos.

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 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 climatização para arrefecimento reduziram em valores superiores a 10%. Também foi verificado que 8cm de substrato é o suficiente para estabilizar a temperatura na base da camada da cobertura.

3 Caso de estudo

Os modelos reduzidos de cobertura verde originalmente utilizados pelo projeto NativeScapeGR, que estão instalados no Instituto Superior de Agronomia, desde 2015. O projeto NativeScapeGR pretende otimizar o uso de água para a manutenção do valor estético e fomentar a biodiversidade de coberturas ajardinadas em clima mediterrânico (FCT, 2015). Os tabuleiros alvos deste estudo e do projeto mencionado encontram-se instalados na cobertura do Herbário João de Carvalho e Vasconcelos, do Instituto Superior de Agronomia (ISA).

Dos doze tabuleiros utilizados no projeto apenas quatro foram estudados na presente dissertação para monitorização durante duas campanhas, de inverno e verão. Os detalhes de cada tabuleiro são enunciados neste capítulo, em particular, a sua localização, a vegetação e o substrato utilizado. São também descritos os procedimentos efetuados assim como os equipamentos e sensores utilizados para medir as grandezas físicas.

3.1 Amostra

3.1.1 Localização

O Herbário João de Carvalho e Vasconcelos pertence ao ISA que se situa em Lisboa. Na Figura 3.1 apresentam-se os mapas disponibilizados na página de internet do ISA evidenciando a localização do herbário. Ambos os mapas estão orientados a norte.

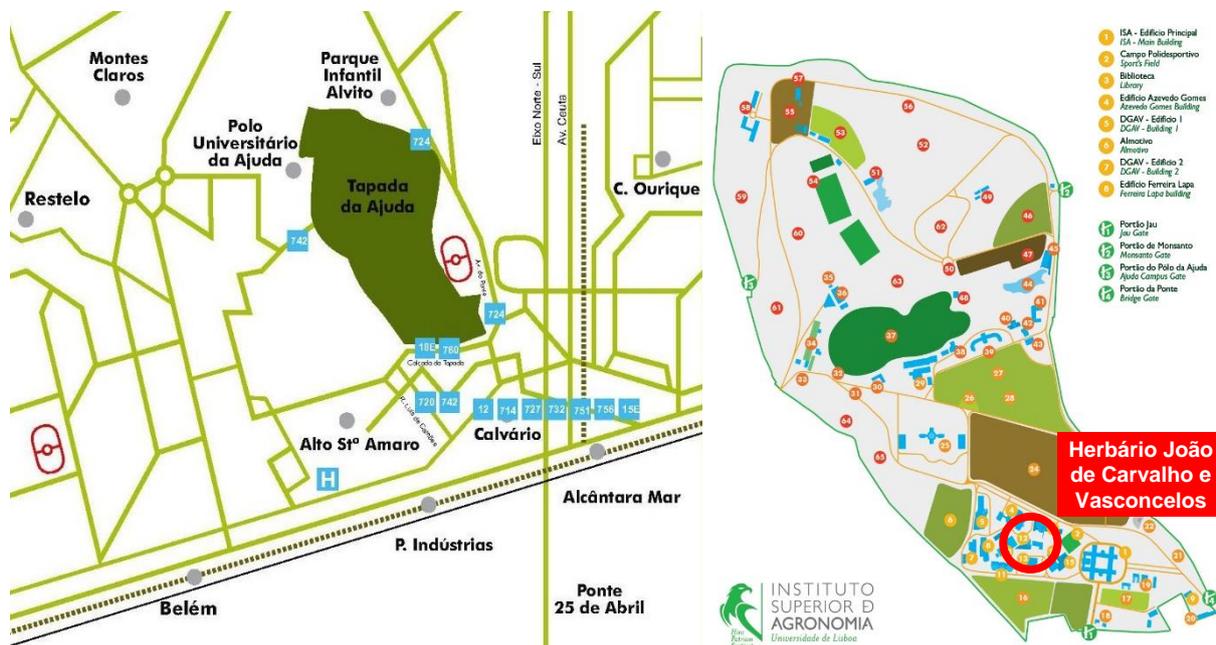


Figura 3.1 - Mapas da localização do ISA/Tapada da Ajuda e do herbário na Tapada (ISA, 2016)

Na Figura 3.2 é apresentada uma vista aérea do Herbário João de Carvalho e Vasconcelos, onde foram identificados os tabuleiros utilizados neste estudo.



Figura 3.2 - Vista aérea do herbário, localização e orientação dos tabuleiros

3.1.2 Caracterização dos tabuleiros

Os tabuleiros do projeto NativeScapeGR foram construídos em chapa metálica e têm forma retangular. Têm um comprimento de 2,5m, largura de 1m, altura de 0,2m e uma espessura de 1,5mm. Os tabuleiros estão assentes numa estrutura metálica com 0,8m de altura deixando-os a essa altura do chão. Dentro dos tabuleiros foi colocada uma camada de 0,15m de substratos assentes sobre uma membrana drenante protegida por uma manta geotêxtil para impedir a passagem de partículas finas. A camada de substrato sofreu algum assentamento natural resultando numa espessura total de 0,13m. A membrana drenante e o geotêxtil têm uma espessura de 0,02m que inclui também a espessura da chapa metálica do tabuleiro.

Sob os quatro tabuleiros seleccionados foi criado um compartimento utilizando placas de poliestireno expandido extrudado, com 10cm de espessura, como pavimento e paredes. Para melhorar a estanqueidade dos compartimentos foram utilizadas correias para cintar as paredes e foram utilizados travamentos entre eles e os tabuleiros adjacentes. Os compartimentos interiores ficaram então com dimensões de 2,5x1x0,7m. No seu interior, para além dos equipamentos utilizados neste estudo existia também um udógrafa do projeto NativeScapeGR. Na Figura 3.3 podem ser observados os pormenores descritos: em a) está representado o interior e em b) está o exterior onde podem ser vistas as correias e os travamentos que melhoram a estanqueidade dos compartimentos.



a) Interior de um compartimento

b) Correias e travamentos

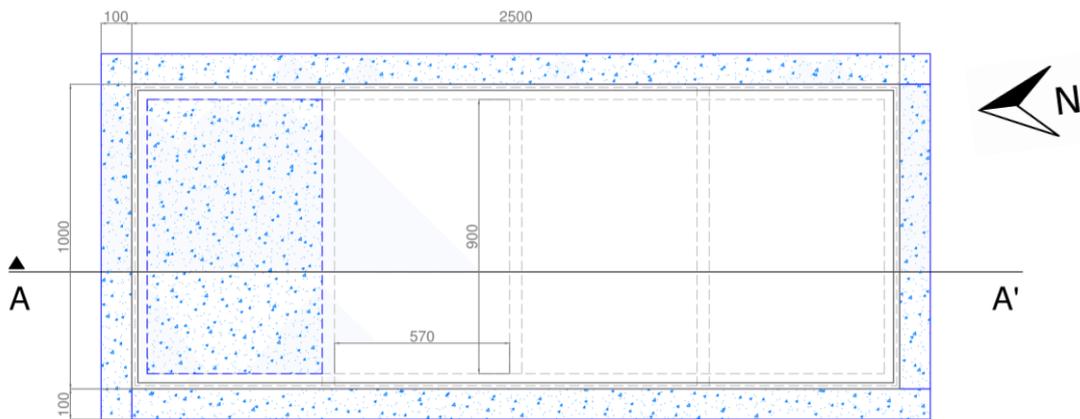
c) Zonas com e sem isolamento

Figura 3.3 - Pormenores dos compartimentos

A superfície do tabuleiro foi dividida em duas zonas, com e sem isolamento térmico, colocando uma placa de 3cm de poliestireno expandido extrudido na zona com isolamento. Estas zonas podem ser observadas na Figura 3.3 c). Elas permitiram estudar a influência do isolamento térmico no desempenho térmico das coberturas verdes.

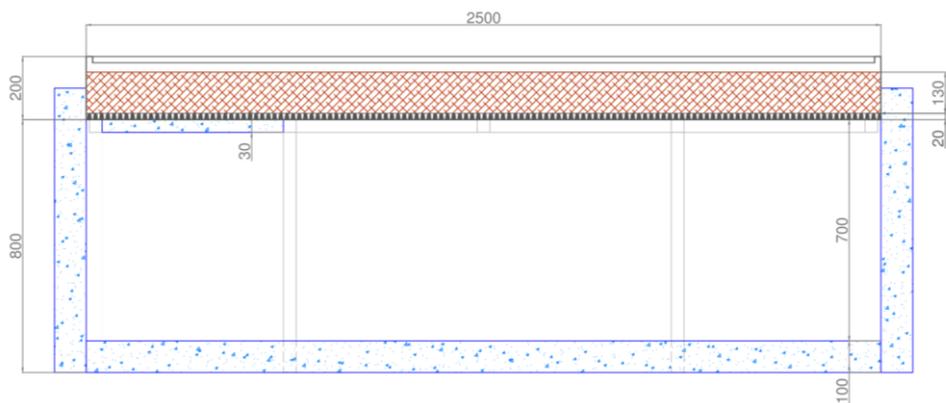
Na Figura 3.4 estão representados os tabuleiros de forma esquemática. Esses desenhos são uma planta e um corte longitudinal. As dimensões representadas estão em milímetros. A Figura 3.5 detalha as camadas que constituem cada tabuleiro. O sistema de drenagem é composto por uma membrana drenante (Floradrain FD 25-E) protegida por dois geotêxteis, um em cada superfície.

Seguidamente estão distinguidas as características dos tabuleiros escolhidos referentes à sua vegetação e ao seu substrato. A seleção foi feita para avaliar a influência quer do substrato quer da vegetação.



- Legenda:**
Materiais/ Estrutura
 Isolamento térmico (poliestireno extrudido)
 Estrutura metálica/ Suporte resistente
 Tabuleiro

(a) Planta



- Legenda:**
Materiais/ Estrutura
 Isolamento térmico (poliestireno extrudido)
 Estrutura metálica/ Suporte resistente
 Tabuleiro
 Substrato
 Filtro, membrana drenante e manta de protecção mecânica

(b) Corte longitudinal

Figura 3.4 - Desenhos esquemáticos dos tabuleiros [mm] (Meneses, 2015)

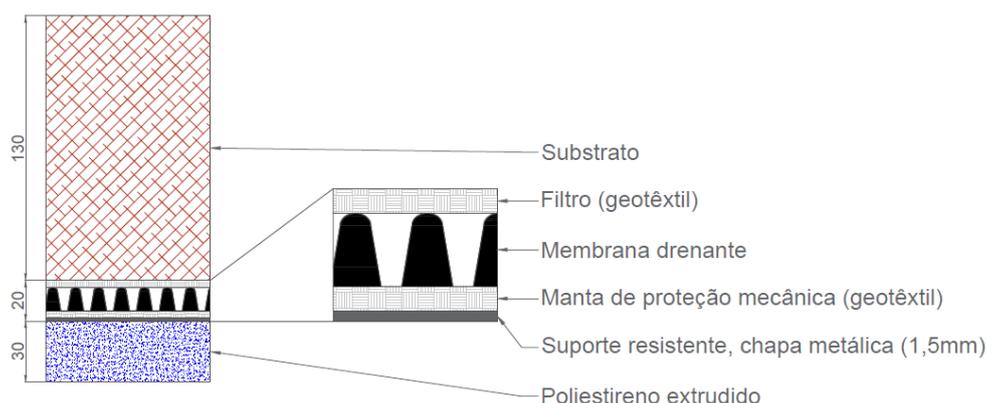


Figura 3.5 - Detalhe do perfil dos tabuleiros [mm] (Meneses, 2015)

3.1.2.1 Caracterização dos substratos

No projeto NativeScapeGR (FCT, 2015) existiam três tipos de substratos mas nesta dissertação foram estudados apenas dois. Adotou-se a mesma designação utilizada nesse projeto, substratos S1 e S2. Os substratos são constituídos por areia, limo, argila e matéria orgânica (MO). Na Tabela 3.1 pode ser consultada a composição dos substratos, em percentagem, bem como as concentrações de azoto (N), óxido de potássio (K_2O) e pentóxido de fósforo (P_4O_{10}). Na Tabela 3.2 são indicadas ainda algumas características dos substratos como a textura, o pH, a massa volúmica aparente (Mva) e condutibilidade hidráulica saturada (Ksat).

Tabela 3.1 - Composição dos substratos (Meneses, 2015)

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 (Meneses, 2015)

Substrato	Textura	pH	Mva (g/cm^3)	Ksat (cm/dia)
S1	- ¹	5.15	0,383	5214
S2	Arenosa	7.38	0,883	3675

A textura e a estrutura de um substrato constituem duas propriedades determinantes no seu comportamento, condicionando a capacidade de reter água, disponibilizar oxigénio, fornecer e reter nutrientes (Silveira de Borba, 2012).

As proporções de areia, limo ou silte e argila são o fator que determina a textura do solo. Os grãos de areia têm dimensões entre os 2-0,05mm, os de limo entre 0,05-0,002mm e os grãos de argila têm dimensões inferiores a 0,002m (Silveira de Borba, 2012). Os solos podem ter textura arenosa, quando os seus grãos são mais grosseiros, ou textura argilosa, quando os seus grãos são mais finos.

¹ A Textura deste substrato não está definida por este ser essencialmente orgânico.

Quando o solo tem proporções equilibradas denominam-se francos que podem ter alguma tendência, franco-argilosos, franco-limosos ou franco-arenosos.

Cada tipo de partícula tem contribuição diferente no desempenho do solo, quer em termos biológicos, como as capacidades de absorção e transferência de água, a retenção e fornecimento de nutrientes (e.g. cálcio, o potássio, o magnésio e o fósforo), entre outros, quer em termos térmicos que é o que se pretende estudar.

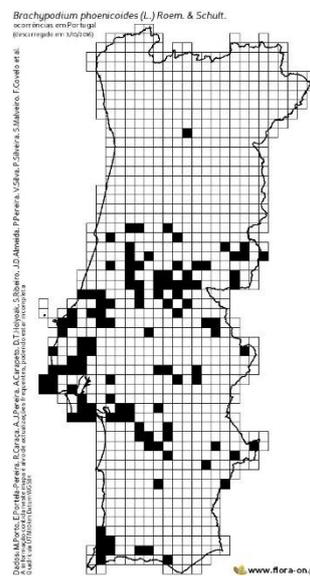
3.1.2.2 Caracterização da vegetação

Nesta tese foi avaliada a influência dos diversos tipos de vegetação no desempenho térmico das coberturas verdes. Para colonizar o substrato dos 12 tabuleiros do projeto NativeScapeGR foram utilizados três espécies vegetais combinadas ou não com musgo: (i) o braquipódio (*Brachypodium Phoenicoides*), (ii) o rosmaninho (*Lavandula Luisieri*) e (iii) o alecrim (*Rosmarinus Officinalis*). *Pleurochaete* é o nome científico do tipo de musgo utilizado.

Brachypodium Phoenicoides é uma planta da família das *Poaceae*, autóctone (i.e. que ocorre naturalmente) no território português, é conhecida como braquipódio e tem floração em maio e junho (Porto, et al., 2016). É uma planta com flor, com folhas estreitas e compridas, podendo atingir alturas de 1m, com muita densidade que fornecem um sombreamento moderado. Têm distribuição mediterrânica e em Portugal tem maior ocorrência no centro em matos e terrenos incultos. Na Figura 3.6 é apresentada uma amostra num dos tabuleiros, em a), e a sua distribuição em Portugal, em b).



a) Amostra no tabuleiro



b) Distribuição da espécie em Portugal (Porto, et al., 2016)

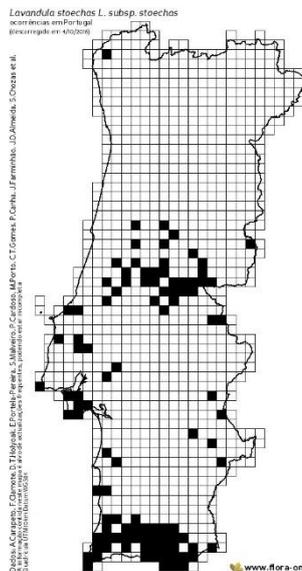
Figura 3.6 - *Brachypodium Phoenicoides* (Braquipódio)

Lavandula Luisieri é também uma planta da família *Lamiaceae*, autóctone no território português, tem os nomes comuns de rosmaninho, cabeçuda e arçã e tem floração de fevereiro a junho (Carapeto, et al., 2016). É um arbusto de pequeno porte, 20-40cm, com folhas estreitas e flores agrupadas, fornecendo um efeito de sombra elevado. Dá-se na região mediterrânica junto ao mar, em

altitudes entre os 0-300m e em Portugal é mais predominante na zona sul. Na Figura 3.7 é apresentada uma amostra num dos tabuleiros, em a), e a sua distribuição em Portugal, em b).



a) Amostra no tabuleiro



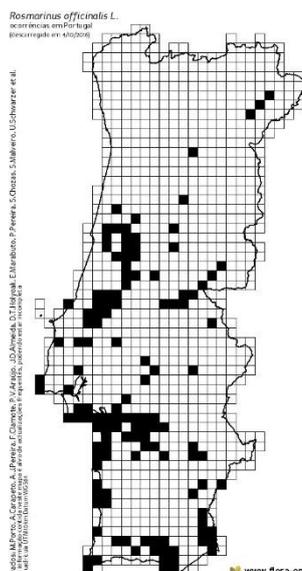
b) Distribuição da espécie em Portugal (Carapeto, et al., 2016)

Figura 3.7 - *Lavandula Luisieri* (Rosmaninho)

Rosmarinus Officinalis é uma planta da família *Lamiaceae*, autóctone-apófito (i.e. com ocorrência natural mas com dispersão auxiliada pelo homem) no território continental português, normalmente chamada de alecrim e com floração mais frequente entre janeiro a abril (Porto, et al., 2016). É um arbusto muito ramificado com hastes lenhosas e folhas pequenas e finas e pode atingir 1,5m de altura, fornecendo um efeito de sombra elevado. É também frequente na região mediterrânica com preferência pelo litoral, como acontece em Portugal, Centro e Sul. Na Figura 3.8 é apresentada uma amostra num dos tabuleiros, em a), e a sua distribuição em Portugal, em b).



a) Amostra no tabuleiro



b) Distribuição da espécie em Portugal (Porto, et al., 2016)

Figura 3.8 - *Rosmarinus Officinalis* (Alecrim)

Pleurochaete é uma espécie de musgo, pertencente à família *Pottiaceae*, que é resistente à radiação solar. As suas folhas são estreitas e não nervuradas que se curvam afastando-se do caule, direitas quando húmidas encaracoladas quando secas (O'Reilly, 2010). O musgo atinge uma altura ente 2-6cm e tem crescimento horizontal, podendo abranger uma grande área e providenciar um efeito de sombra elevado, que melhora quando está hidratado. O pormenor desta planta está na Figura 3.9 nos dois estados de hidratação observados, hidratado, em a), e desidratado, em b).



a) Hidratado (FCT, 2015)



b) Desidratado

Figura 3.9 - Pleurochaete (Musgo)

Na Tabela 3.3 faz-se uma recolha das características de cada espécie vegetal estudadas.

Tabela 3.3 - Resumo das características da vegetação (adaptado de Meneses, 2015)

Espécie	Família	Floração	Região	Zona PT	Altura	Folhagem	Efeito de sombra
Braquipódio	<i>Poaceae</i>	Maió-junho	Mediterrâneo	Centro	1m	Folhas compridas, finas e em grandes quantidades	Moderado
Alecrim	<i>Lamiaceae</i>	Janeiro-abril	Mediterrâneo	Centro e Sul (litoral)	1,5m	Folhas pequenas e compridas	Elevado
Rosmaninho	<i>Lamiaceae</i>	Fevereiro-junho	Mediterrâneo	Sul	20 a 40cm	Folhas estreitas	Elevado
Pleurochaete	<i>Pottiaceae</i>	-	-	-	2 a 6cm	Folhas estreitas e finas	Elevado (quando hidratado)

3.1.2.3 Tabuleiros monitorizados

Dos tabuleiros existentes selecionaram-se os seguintes tabuleiros para avaliar a influência quer da vegetação quer do substrato: T3, T5, T6 e T7. As posições podem ser consultadas na Figura 3.2.

Para avaliar a influência do solo, selecionaram-se tabuleiros com vegetações iguais mas com substratos diferentes. É o que acontece com os tabuleiros T3 e T7, ambos têm braquipódio como vegetação e têm o substrato S2 e S1, respetivamente.

Para avaliar a influência da vegetação escolheu-se o substrato S1, utilizado no tabuleiro T7, e selecionaram-se duas vegetações diferentes, tabuleiros T5 e T6. Em ambos existe alecrim, sendo a única espécie no tabuleiro T6. No tabuleiro T5, para além do alecrim, existe rosmaninho, braquipódio, e musgo.

Na Tabela 3.4 é demonstrada a constituição de cada tabuleiro, os substratos e a vegetação.

Tabela 3.4 - Composição dos tabuleiros (Meneses, 2015)

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

A Figura 3.10 apresenta as fotografias dos quatro tabuleiros seleccionados onde se pode ver a sua vegetação, as suas espécies e a densidade.

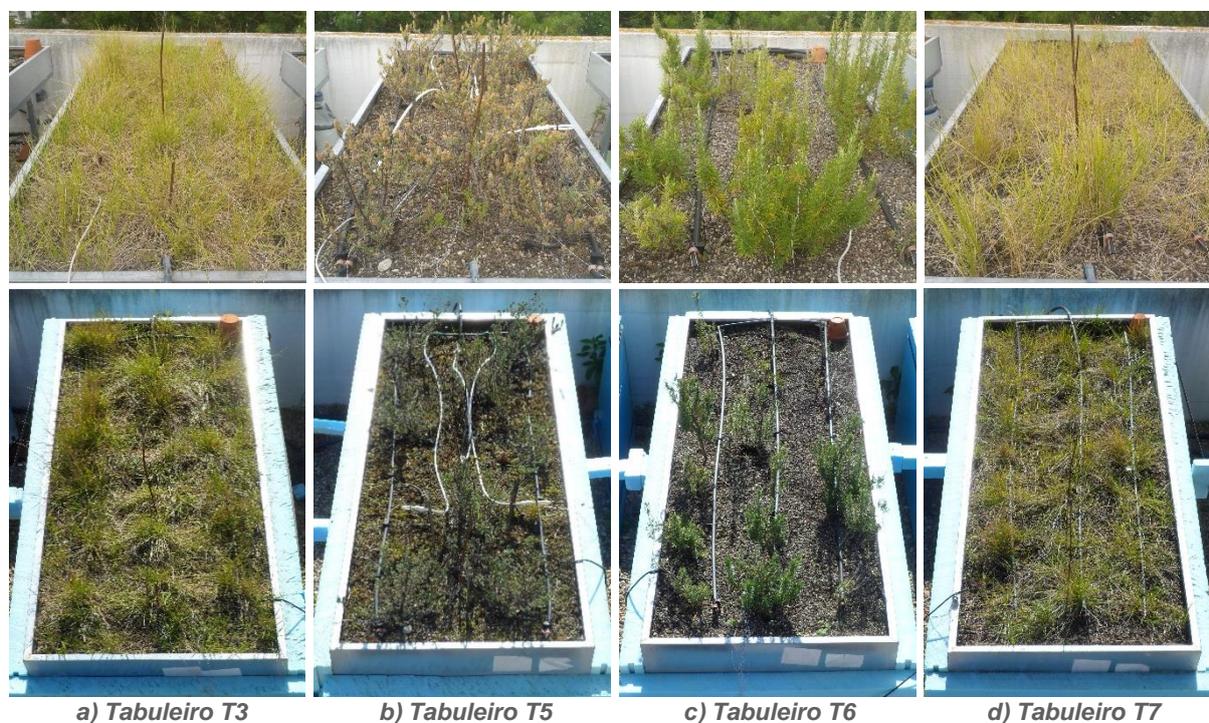


Figura 3.10 - Tabuleiros (4-Fev-2016)

Na Tabela 3.5 são apresentadas os coeficientes de absorção de cada tabuleiro. O coeficiente de absorção é a diferença do coeficiente de reflexão, razão entre a radiação incidente com a refletida, à unidade por este se tratar de um elemento opaco. Estes coeficientes foram determinados utilizando dois piranómetros na posição horizontal apontados em sentidos diferentes, para cima e para baixo, medindo os valores para a radiação incidente, com o piranómetro virado para cima, e da refletida por cada tabuleiro, virado para baixo. Com isto foram determinados os valores do coeficiente de reflexão e absorção para cada tabuleiro, que podem ser consultados na Tabela 3.5. Este procedimento foi realizado pelo aluno Gustavo Meneses em Julho de 2015 (Meneses, 2015) e aceitam-se como válidos para o trabalho da presente dissertação.

Tabela 3.5 - Coeficientes solares dos tabuleiros (Meneses, 2015)

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			

3.1.2.4 Rega

Durante a campanha de inverno não foi necessária rega por ter existido precipitação suficiente durante esse período. Na campanha de verão todos os tabuleiros em estudo foram alvo de rega automática, nas mesmas quantidades para todos os tabuleiros de acordo com a sua evapotranspiração de referência, usando um fator de 60% (60% ET₀), resultando num caudal de 3,5mm por dia. Assim, rega do tabuleiro T5, por ter musgo, acontecia às 8h, 10h e 19h por dois sistemas, pulverização e gota-a-gota. A rega dos restantes tabuleiros, T3, T6 e T7, acontece apenas às 8h e pelo sistema gota-a-gota.

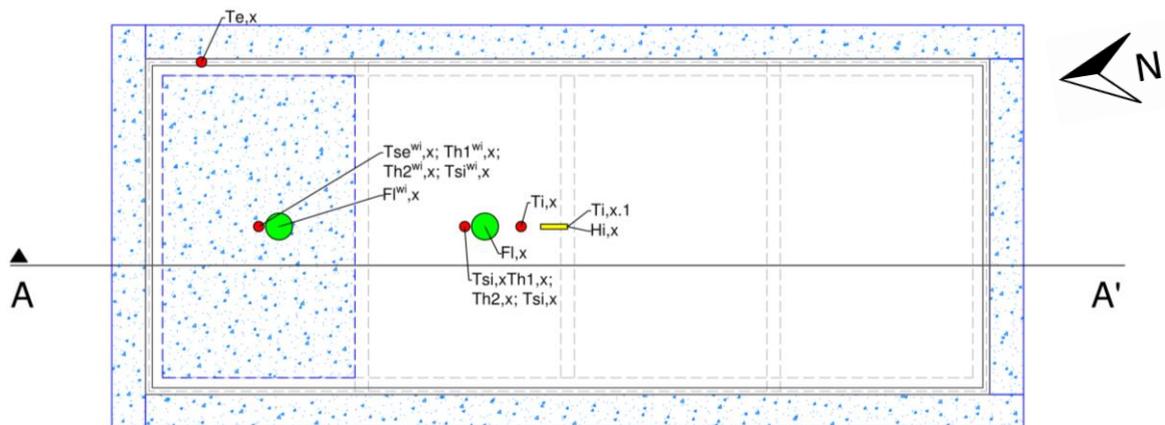
3.2 Procedimento experimental

Foram realizadas duas campanhas, inverno e verão, e medidas as seguintes grandezas: temperaturas, fluxos de calor e radiação. Para fazer essas medições foram utilizados os equipamentos da seguinte lista:

- 38 termopares do tipo T: 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 utilizados para medições de temperaturas;
- 4 fluxímetros Hukseflux HFP01: com sensor de termopilha e uma gama de medição entre -2000 a +2000W/m² que medem o fluxo de calor que passa pelo seu interior;
- 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 80°. Este equipamento mede a radiação solar incidente no plano em que está instalado, neste caso horizontal;
- 4 termohigrómetros: dois TGP-4500 (Tinytag) e dois Rotronic Hidrolog-D que medem a temperatura e humidade relativa do ar. Estes aparelhos são autónomos, medem e registam os dados na sua memória interna, que posteriormente são descarregados para o computador;
- 2 sistemas de aquisição de dados, data loggers: Delta T – DL2e Data Logger com bateria interna e o Campbell – CR10, ligado a uma fonte de alimentação externa constante. Estes registam os dados medidos pelos sensores a eles ligados. O Delta T contém 15 canais, sendo o primeiro de referência, deixando 14 disponíveis. O Campbell contém 25 canais para termopares e outros 6 gerais;

- 1 sistema de aquecimento: lâmpadas incandescentes de 100W ligadas em série e um termostato digital para manter a temperatura com *setpoints* nos 18 e 20°C, ligando as lâmpadas quando a temperatura do ambiente interior do tabuleiro T7 descer aos 18°C e desligando quando atingir aos 20°C. Este sistema foi utilizado apenas na campanha de inverno.

Em cada tabuleiro foram instalados 9 termopares, e em dois deles foram instalado mais um para medir a temperatura exterior. No interior de três tabuleiros foram colocados termohigrômetros e em dois foram instalados dois fluxímetros de acordo com a disposição das Figura 3.11 a), em planta, e da Figura 3.11 b), em perfil (corte AA').



Legenda:

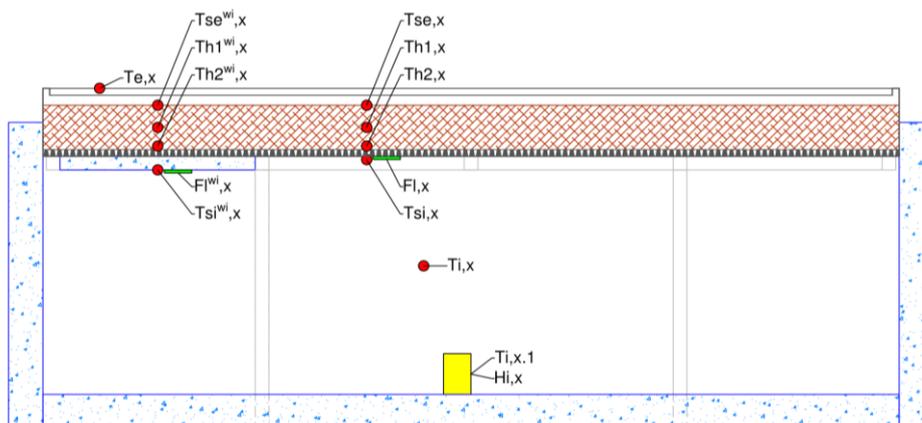
Materiais/ Estrutura

- Isolamento térmico (poliestireno extrudado)
- Estrutura metálica/ Suporte resistente
- Tabuleiro

Equipamentos

- Fluxímetro
- Termopar
- Termohigrómetro

a) Planta



Legenda:

Materiais/ Estrutura

- Isolamento térmico (poliestireno extrudado)
- Estrutura metálica/ Suporte resistente
- Tabuleiro
- Substrato
- Filtro, membrana drenante e manta de proteção mecânica

Equipamentos

- Fluxímetro
- Termopar
- Termohigrómetro

b) Corte AA'

Figura 3.11 - Desenhos de um tabuleiro, com a localização dos sensores. (Meneses, 2015)

No ambiente exterior foi colocado o piranómetro, no bordo do tabuleiro T7. Junto ao piranómetro foi também colocado um termopar para fazer a medição da temperatura exterior. Para as medições da temperatura do solo, à superfície e em profundidade, foram amarrados termopares com fita adesiva a estacas de aço que foram posteriormente cravadas no solo, nas zonas com e sem isolamento. O termopar para fazer a leitura mais profunda (h2) estava junto da base da estaca e o de meia altura (h1) estava a 6,5cm do primeiro, já que o terreno tem 13cm de altura na zona de medição. Colocou-se também um termopar na superfície exterior. Na Figura 3.12 encontram-se os detalhes da instalação dos equipamentos no exterior. No exterior foram colocados no total seis termopares por tabuleiro e dois adicionais para medir as temperaturas exteriores. Além disso, a instalação inclui um piranómetro e um termohigrómetro, Tinytag, pendurado no tabuleiro T4.

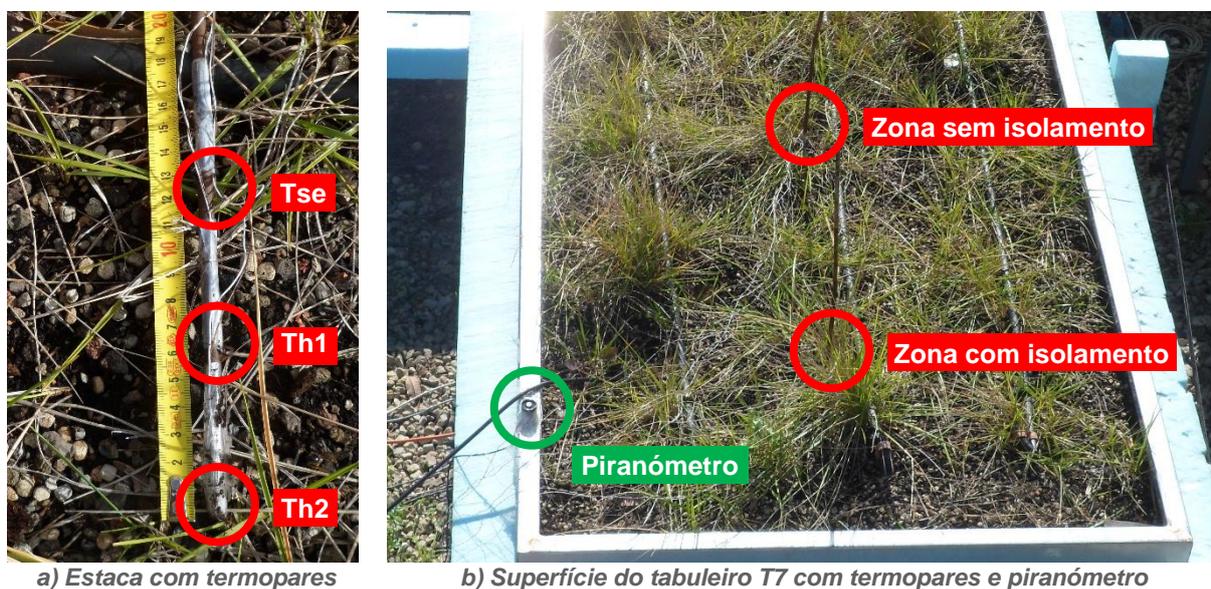


Figura 3.12 - Detalhes da instalação dos termopares e piranómetro no exterior

No interior dos tabuleiros foram instalados três termopares, dois mediam a temperatura das superfícies com e sem isolamento, o mais próximo possível do alinhamento dos termopares enterrados no exterior, fixados com fita adesiva, e um a medir a temperatura do ambiente no centro do compartimento, fixado também com fita adesiva. Os termohigrómetros Rotronic foram colocados de pé sobre as placas de poliestireno extrudido e o Tinytag foi pendurado, ambos no centro do compartimento. Nos dois compartimentos em que foram medidos os fluxos de calor, tabuleiros T5 e T7, foram instalados fluxímetros Hukseflux, fixos à base do tabuleiro por fita adesiva, nas zonas com e sem isolamento, também o mais próximo possível do alinhamento dos termopares enterrados no exterior.

Para a definição gráfica da posição dos sensores considerou-se a base do substrato como origem da escala (cota 0). As restantes cotas partem das distâncias médias a que foram instaladas as células de medição. Essa escala pode ter consultada na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Cotas das células em cada tabuleiro

Célula	Símbolo		Cotas (cm)	
	s/ isolamento	c/ isolamento	s/ isolamento	c/ isolamento
Temperatura exterior	Te		20	
Temperatura da superfície exterior	Tse,x	Tse ^{wi} ,x	13	
Temperatura do substrato a meia altura (h1)	Th1,x	Th1 ^{wi} ,x	6,5	
Temperatura da base do substrato (h2)	Th2,x	Th2 ^{wi} ,x	0	
Temperatura da superfície interior	Tsi,x	Tsi ^{wi} ,x	-2	-5
Temperatura interior	Ti,x		-10	

Na campanha de inverno foi utilizado um sistema para fazer a climatização do interior dos tabuleiros, com o objetivo de manter as temperaturas de conforto no interior acima de um valor mínimo. Para isso, foi colocada uma lâmpada incandescente no interior de cada tabuleiro. As lâmpadas dos vários tabuleiros estavam ligadas em série a um termostato instalado no tabuleiro T7. O termostato foi definido para a temperatura interior do tabuleiro T7 não ser inferior a 18°C que é a temperatura mínima de conforto no inverno definida pelo Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação, REH. Quando o interior do compartimento do tabuleiro T7 atingia os 18°C o termostato ligava todas as lâmpadas, aquecendo o ambiente interior de todos os tabuleiros, e desligava-as ao atingir os 20°C.

Os detalhes da instalação dos equipamentos no interior estão ilustrados na Figura 3.13 para os sensores e na Figura 3.3 a) para as lâmpadas e Tinytag.

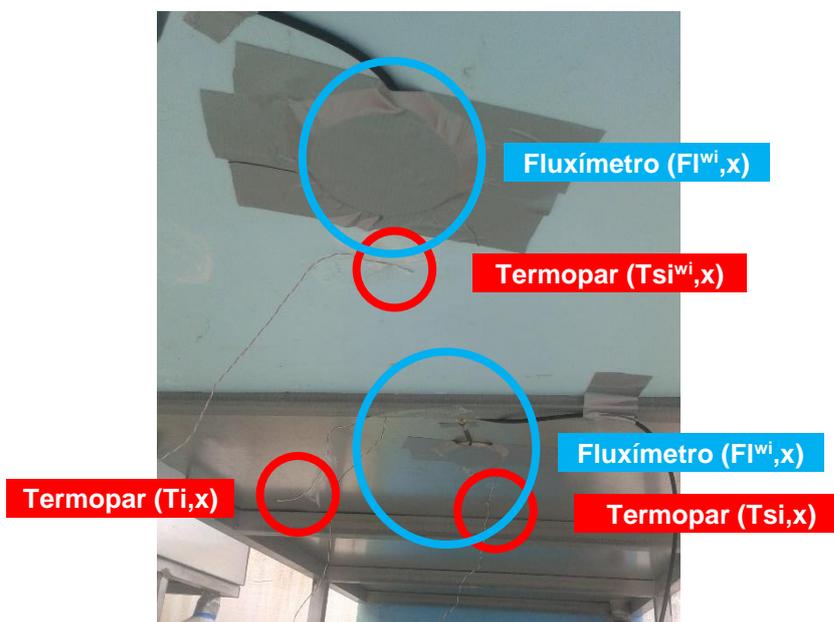


Figura 3.13 - Sensores no interior dos compartimentos sob os tabuleiros

Todos os sensores foram ligados aos *data loggers*, Campbell e Delta T, Figura 3.14, a) e b) respetivamente, exceto os termohigrómetros que são autónomos. Estes equipamentos de recolha e registo de dados estão representados na Figura 3.14.



a) Campbell

b) Delta T

Figura 3.14 - Data loggers

Nas Tabelas 3.7 e 3.8 e estão apresentados os equipamentos instalados em cada tabuleiro.

Devido a um problema num canal do Campbell foi feita uma alteração de um fluxímetro da campanha de inverno para a campanha de verão. O fluxímetro FI^{wi},5 que estava ligado ao Campbell na campanha de inverno passou a estar ligado ao Delta T na campanha de verão.

Tabela 3.7 - Equipamento nos tabuleiros T3, T5 e T6

		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		
		Humidade	Hi,3,R			X	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	
		Fluxo	Ti,5	X			
		FI,5		X			
		FI ^{wi} ,5	X _{inverno}		X _{verão}		
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				
		Humidade	Ti,6,T				X
		Hi,6,T				X	

Tabela 3.8 - Equipamento no tabuleiro T7 e exterior

			Data logger				Rotronic	Tinytag
			Campbell			Delta T		
			Termopar	Fluxímetro	Piranómetro	Termopar		
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	Fi,7		X					
	Fi ^{wi} ,7		X					
Exterior	Temperatura	Te,T					X	
	Humidade	He,T					X	
	Radiação Solar	RS			X			

A instalação dos equipamentos para a campanha de inverno foi executada no dia 18 de janeiro de 2016 e decorreu até ao dia 24 de fevereiro.

Para a campanha de verão, a instalação foi executada a 4 de julho de 2016 e a recolha de dados prolongou-se até ao dia 26 de julho.

4 Análise e discussão de resultados

Neste capítulo apresenta-se a análise e discussão dos dados monitorizados durante as campanhas de inverno e verão. Os dados foram registados a cada 10 minutos fazendo uma média dos valores recolhidos a cada minuto. Cada sensor devolvia um valor de intensidade da corrente (em miliVolts) que foi convertido automaticamente pelos *loggers* de acordo com as constantes de cada dispositivo.

4.1 Descrição da análise

Os resultados são apresentados em dias completos, isto é das 00h00 as 23h50 de cada dia. Omitiram-se os dias de montagem e desmontagem dos equipamentos e também dias que continham erros de leitura que condicionavam a análise.

Os dados recolhidos durante o decorrer das campanhas foram analisados inicialmente de uma forma geral para comparar o desempenho normal dos tabuleiros. Posteriormente foram analisados dias tipo, característicos de cada estação, sendo no inverno os dias com menores temperaturas e menor radiação solar e no verão o dia com as temperaturas mais altas. Esta comparação entre dias foi feita utilizando o conceito de temperatura Ar-Sol. Isto permitiu fazer uma análise mais detalhada do comportamento térmico nas condições mais adversas de cada estação. Foi analisado o gradiente térmico medido pelas células instaladas nas diversas profundidades em intervalos de 4h. A comparação entre as zonas com e sem isolamento térmico foi complementada com a análise dos fluxos de calor.

Com a análise dos resultados gerais das campanhas pretende-se detetar padrões no comportamento dos diversos tabuleiros durante o período das campanhas. Foram estudadas as temperaturas, os efeitos da humidade e radiação solar e os fluxos de calor.

Utilizou-se o tabuleiro T7 como tabuleiro de referência pois tem o substrato da mesma natureza dos tabuleiros T5 e T6 e a mesma vegetação do tabuleiro T3.

Para cada campanha são expostos e analisados os seguintes gráficos:

- Temperatura exterior, temperaturas interiores de todos os tabuleiros e radiação solar;
- Diferenças de temperaturas do ambiente interior e das superfícies nas zonas com e sem isolamento, de todos os tabuleiros em relação ao tabuleiro de referência;
- Fluxos de calor dos tabuleiros T5 e T7 e radiação solar;
- Temperaturas e humidades relativas do tabuleiro T7 no interior e no exterior;
- Coeficientes de transmissão térmica e precipitação no inverno e radiação solar no verão.

Para perceber melhor o efeito da presença de água no substrato das soluções de cobertura verde, por rega e precipitação, foi feita uma estimativa dos valores do coeficiente de transmissão térmica para o tabuleiro T7. Partindo da Lei de Fourier, equação (4.1), pode-se calcular o fluxo de calor que atravessa o sistema. Esta lei refere que o fluxo de calor transmitido por condução é diretamente proporcional ao gradiente negativo de temperatura entre dois pontos.

$$q'' = \frac{Q}{A} = -\lambda \frac{dT}{dx} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (4.1)$$

Em que:

q'' – Fluxo de calor [W/m^2];

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

A – Área da secção [m^2];

λ – Condutibilidade térmica do material [$W/m^\circ C$];

dT – Diferença de temperaturas [$^\circ C$];

dx – Espessura do material [m].

Adotando uma área da secção unitária, o fluxo na cobertura pode ser calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$Q = U (T_e - T_i) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (4.2)$$

Em que:

U – Coeficiente de transmissão térmica [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$];

T_e – Temperatura exterior [$^\circ C$];

T_i – Temperatura interior [$^\circ C$];

Para estudar as variações do coeficiente de transmissão térmica, U , durante as campanhas usando os valores medidos utilizou-se a expressão:

$$U = \frac{Q}{T_e - T_i} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad (4.3)$$

Em cada estação existem critérios diferentes para a seleção do dia tipo, com o objetivo de caracterizar o desempenho de coberturas verdes semi-intensivas nesse período. O conceito de temperatura Ar-Sol, relaciona as temperaturas reais com os efeitos da radiação incidente. Este conceito de temperatura tem como objetivo simular as condições de transferência de calor de um paramento em que não existe radiação exterior, resultando numa temperatura fictícia que igualasse a mesma taxa de fluxo de calor que as condições em que existe transferências de calor por radiação (Jones, 2001). Esta temperatura pode ser calculada pela fórmula (4.4) utilizando os dados do tabuleiro de referência:

$$T_{Ar-Sol} = T_e + \frac{\alpha \times RS}{h_{se}} \left[^\circ C \right] \quad (4.4)$$

Onde:

T_e – Temperatura ambiente exterior [$^\circ C$];

α – Coeficiente de absorção;

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

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

Os dados para os dias tipo estão apresentados graficamente e também de forma estatística, com valores máximos, mínimos e médios para todas as grandezas medidas que se materializa em tabelas. Para os dias tipo de cada campanha foram analisados gráficos que relacionam:

- Temperaturas interiores e da superfície exterior de todos os tabuleiros, temperatura exterior e radiação solar;
- Fluxos de calor dos tabuleiros T5 e T7 e radiação solar;
- Temperaturas do substrato do tabuleiro de referência e radiação solar;
- Temperaturas do substrato de todos os tabuleiros em intervalos de 4h;

Para analisar o desenvolvimento das temperaturas ao longo do dia nas várias profundidades do tabuleiro, são apresentadas as temperaturas medidas em momentos equidistantes para cada zona de cada tabuleiro sobre uma representação do seu corte. As 24h do dia são divididas em intervalos de 4h com os valores das 0, 4, 8, 12,16 e 20h a serem representativos desse intervalo. Estes intervalos mostraram as variações térmicas dos tabuleiros às diferentes profundidades medidas, utilizando os valores da Tabela 3.6.

4.2 Campanha de inverno (estação de aquecimento)

Conforme descrito no capítulo 3.1, a campanha experimental na estação de aquecimento decorreu desde o dia 18 de janeiro até ao dia 24 de fevereiro de 2016. Selecionou-se o período de 6 a 10 de fevereiro como representativo. Durante este período, os tabuleiros T5, T6 e T7 estiveram climatizados com uma lâmpada a funcionar sempre que a temperatura interior se encontra entre 18°C e 20°C. No tabuleiro T3, a lâmpada não esteve em funcionamento.

4.2.1 Resultados gerais da campanha

Na Figura 4.1 estão apresentados graficamente os dados de temperatura exterior (Te) e interior dos compartimentos sob todos os tabuleiros (Ti,x) em °C e a radiação solar em W/m². Para a temperatura exterior foram utilizados os dados do termohigrómetro Tinytag junto ao tabuleiro T4. Dado que a lâmpada incandescente do compartimento sob o tabuleiro T3 não estava em funcionamento, o andamento da temperatura interior relaciona-se com o da temperatura exterior.

Os dados do vento apresentados na Figura 4.2 (velocidade, rajada e direção) foram recolhidos na estação meteorológica do Instituto Superior Técnico IST (meteoTécnico) e consideram-se semelhantes aos sentidos junto aos tabuleiros.

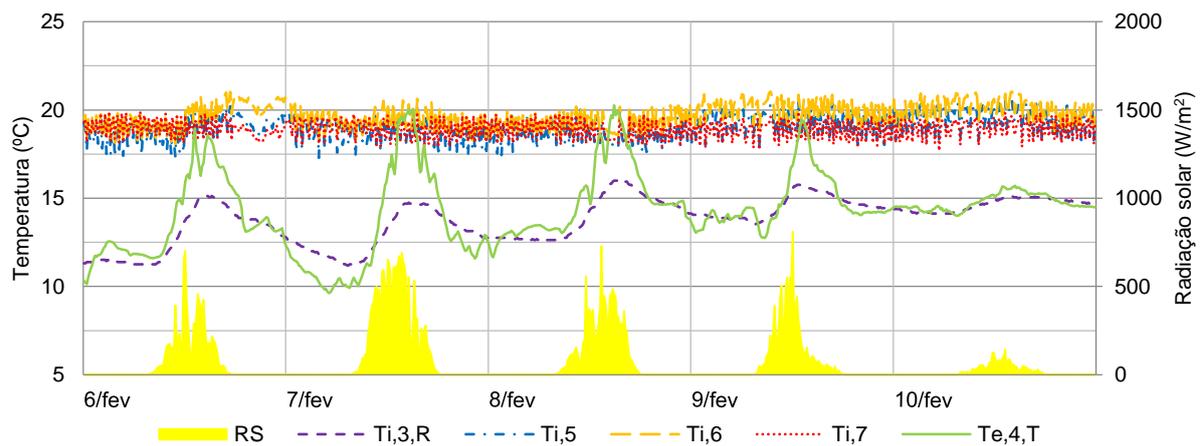


Figura 4.1 - Temperatura exterior e interior dos tabuleiros e radiação solar na campanha de inverno

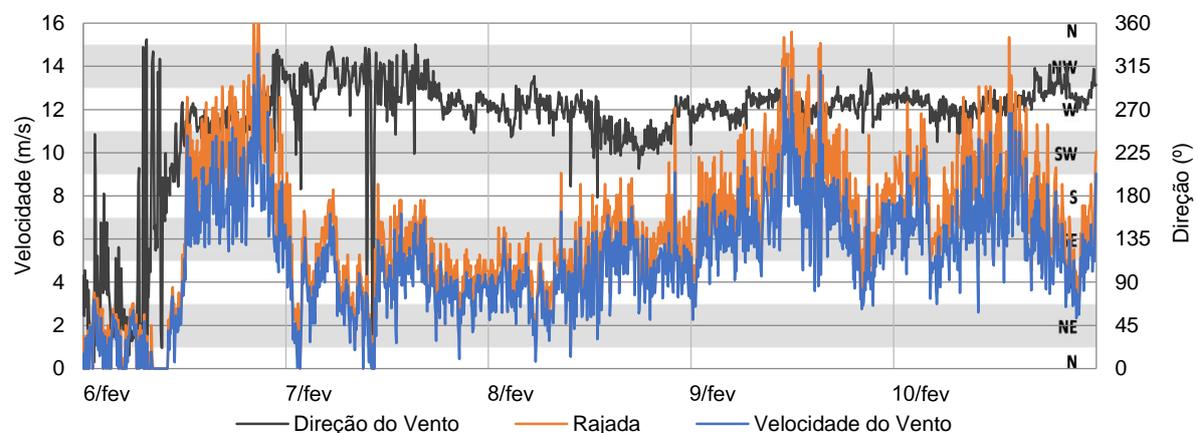


Figura 4.2 - Velocidade e direção do vento no IST durante a campanha de inverno (meteoTécnico)

A Figura 4.1 mostra que, como seria de esperar, a temperatura exterior é influenciada pela radiação solar. A temperatura máxima foi 25,65°C às 11h30 do dia 7. A temperatura mínima ocorreu às 3h10 do mesmo dia com o valor de 10,07°C.

Pela análise da Figura 4.1 verifica-se também que a climatização dos compartimentos através de lâmpadas incandescentes teve sucesso. O termostato que regulava o sistema de aquecimento foi eficaz em manter as temperaturas interiores dos tabuleiros entre os 18 e 20°C. O tabuleiro T7 manteve-se sempre entre os 18 e 20°C pois era este que controlava os dispositivos de aquecimento de todos os tabuleiros. Nos outros tabuleiros, registaram-se alguns desvios, tendo a temperatura interior do tabuleiro T6 (Ti,6) atingido um máximo de 21,09°C e a temperatura interior do tabuleiro T5 (Ti,5) um mínimo de 17,29°C. Em geral o tabuleiro T6 teve temperaturas superiores aos restantes.

As temperaturas interiores apresentam um comportamento cíclico, que resulta do acender e apagar das lâmpadas. O número de ciclos é relativamente constante com tendência a ser algo superior quando as temperaturas exteriores são inferiores às interiores. No final do dia 6 de fevereiro, devido à grande intensidade do vento (Figura 4.2) e às temperaturas baixas, verificou-se que as lâmpadas permaneceram sempre acesas. A intensidade do vento têm uma influência relevante nestes ciclos pois os compartimentos não são estanques, e estas trocas de ar com o exterior resultam num arrefecimento mais rápido e num aquecimento mais lento.

As temperaturas interiores do tabuleiro T3 (Ti,3,R) sem climatização acompanham as temperaturas exteriores, mas com algum desfasamento, em média uma hora, e com menores amplitudes. Este fenómeno é devido à inércia térmica e ao isolamento térmico dos compartimentos.

4.2.1.1 Temperaturas

A Figura 4.3 estão representadas graficamente as diferenças entre as temperaturas interiores e superficiais exteriores na zona sem isolamento face ao tabuleiro de referência (T7). Na Figura 4.3 a) apresenta-se também a velocidade do vento (registada de 10 em 10 minutos).

Na Figura 4.3 a) observa-se que as temperaturas interiores (Ti) têm ordens de grandeza muito semelhantes (ΔT_i reduzidos) em todos os tabuleiros exceto o T3. Os valores medidos têm maior desvio nos 6, 9 e 10 de fevereiro. Comparando estes dados com os valores da velocidade do vento, verifica-se que o vento tem influência nas temperaturas interiores, pois o andamento de ambas as grandezas é semelhante. Os ventos dominantes durante a campanha tinham direção oeste e o tabuleiro T7, que está situado mais a oeste e desprotegido, é o que se encontra mais exposto ao vento, como pode ser verificado na Figura 3.2. O dispositivo que controlava o aquecimento de todos tabuleiros estava no tabuleiro T7 e, como este estava mais exposto ao vento, os outros tabuleiros podiam continuar a aquecer após atingirem os 20°C enquanto o T7 não atingisse o valor limite de temperatura. Assim, é de esperar que temperaturas interiores do tabuleiro T7 sejam inferiores às dos outros compartimentos que sobreaqueceram.

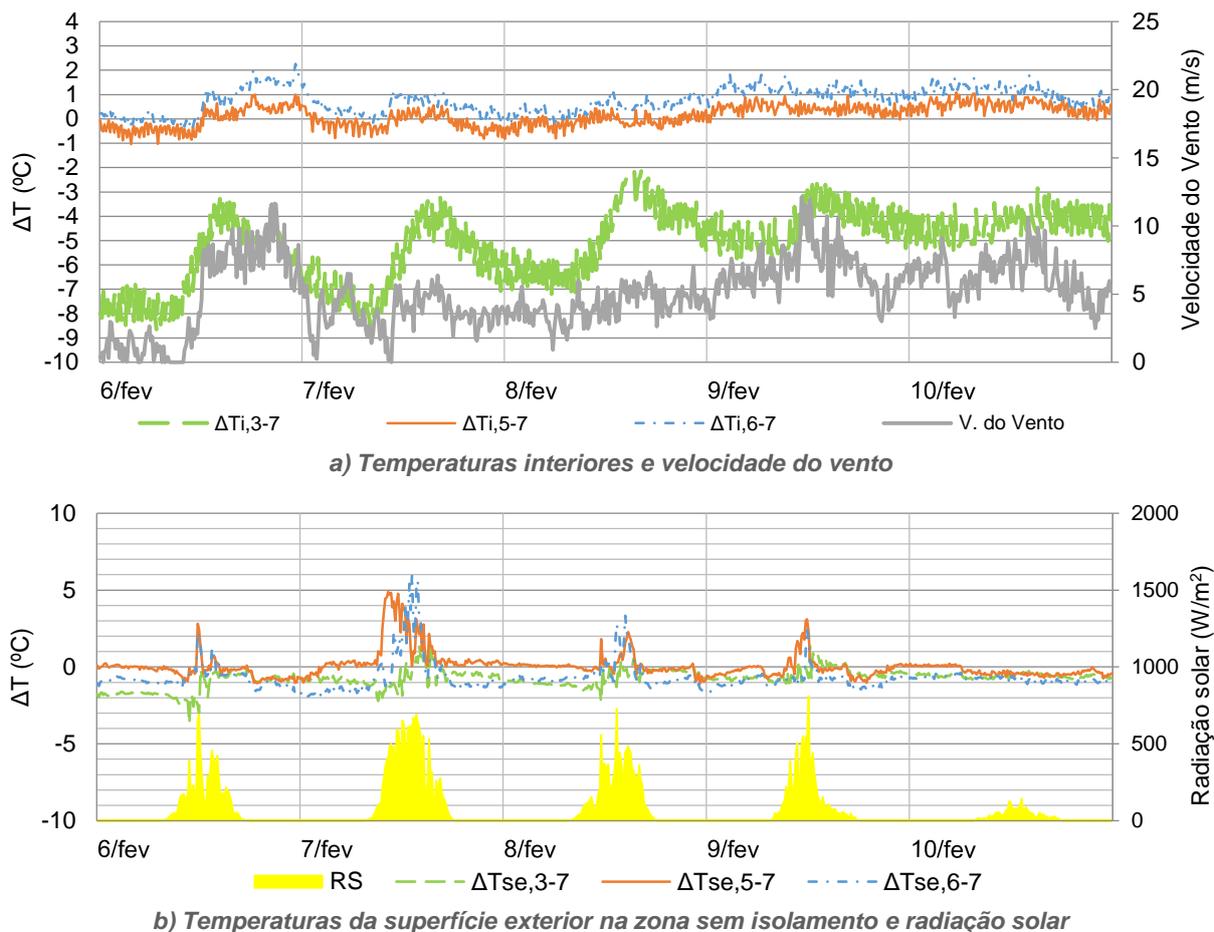


Figura 4.3 - Variações de temperatura dos tabuleiros em relação ao tabuleiro de referência da campanha de inverno

As temperaturas das superfícies exteriores representadas na Figura 4.3 b) apresentam diferenças significativas durante o dia, que chegam a atingir os 6°C para o tabuleiro T6, 5°C para o tabuleiro T5, e 1,5°C para o tabuleiro T3. Porém, estes picos não ocorrem em simultâneo. Isto justifica-se pelo nível de sombreamento que cada tipo de vegetação fornece, variando durante o dia dependendo da posição do sol, causando sombreamento na zona da célula a diferentes alturas do dia. Os valores mínimos da temperatura da superfície exterior (Tse) em relação à do tabuleiro de referência T7 foram conseguidos pelo tabuleiro T3, quase a chegar a uma diferença de -4°C, pois este compartimento não estava climatizado. Já os tabuleiros T5 e T6 atingiram mínimos próximos de -1°C e -2°C, respetivamente.

Com esta análise pode-se concluir o seguinte para cada tabuleiro:

- T5 - este tabuleiro atingiu valores de temperatura interior superiores ao do tabuleiro de referência T7 em situações de vento intenso e manteve as temperaturas interiores ligeiramente inferiores às do tabuleiro T7 nos períodos com pouco vento. As temperaturas superficiais exteriores deste tabuleiro apresentam diferenças visíveis durante o dia quando existe radiação solar. Com vegetação menos densa e com tonalidades mais escuras, o tabuleiro T5 tem um coeficiente de absorção superior ao do tabuleiro de referência (0,82 e 0,71, respetivamente) o que conduz a temperaturas superficiais superiores. Apesar da

baixa densidade da vegetação as temperaturas superficiais mantiveram-se semelhantes às do tabuleiro de referência, mostrando existir benefício na utilização dos musgos;

- T6 - o comportamento das temperaturas interiores foi muito semelhante ao do tabuleiro T5 mas, em média, 0,5°C superior durante todo o período de monitorização, possivelmente por este tabuleiro se encontrar menos exposto ao vento. Também iguais são os coeficientes de absorção. Contudo as temperaturas da superfície exterior deste tabuleiro atingiram picos mais elevados mas nem sempre em simultâneo, que devem ser causados pela vegetação não ser tão densa e pelas diferentes condições de sombreamento dos termopares, respetivamente. Durante a noite este tabuleiro teve as temperaturas superficiais exteriores mais baixas dos tabuleiros aquecidos pois a vegetação não protege a superfície como acontece nos restantes tabuleiros. Como os substratos são iguais e as temperaturas interiores foram superiores, era de esperar que as temperaturas superficiais exteriores tivessem valores também superiores. No entanto, devido à fraca proteção contra o vento por parte das plantas, registaram-se temperaturas superficiais exteriores inferiores, levando a concluir que as perdas pela cobertura deste tabuleiro foram superiores;
- T3 - não estando este tabuleiro no mesmo regime de aquecimento dos restantes, os resultados não são diretamente relacionáveis. Os valores das temperaturas das superfícies exteriores deste tabuleiro registaram-se quase sempre inferiores aos do tabuleiro T7, que tem o mesmo tipo de vegetação mas um substrato diferente. Apesar do coeficiente de absorção deste tabuleiro ser superior ao de referência (0,76 e 0,71, respetivamente), o facto de os tabuleiros terem substratos diferentes e principalmente as condições de temperatura interior serem inferiores no tabuleiro T3 por este não estar climatizado, conduz a temperaturas superficiais exteriores inferiores.

No geral, pode se referir que as maiores perdas de calor ocorrem por ação do vento, estando associadas à estanqueidade dos compartimentos. Observou-se que a vegetação tem influência no comportamento térmico das coberturas verdes, melhorando-o com o aumento da densidade da vegetação. O tabuleiro T6 mostra ter mais perdas pela cobertura pois a sua vegetação pouco densa oferece uma proteção contra o vento muito reduzida em comparação com o braquipódio do tabuleiro T7. O musgo presente no tabuleiro T5 também mostrou ter um efeito benéfico no desempenho térmico das coberturas verdes no inverno.

4.2.1.2 Fluxos de calor

As transferências de calor entre o interior e a cobertura foram quantificadas e medidas por fluxos de calor. Adotou-se que os fluxos ascendentes tomariam valores positivos e os descendentes tomariam valores negativos. Os registos desses fluxos de calor estão representados na Figura 4.4, onde a linha verde contínua representa o fluxo da zona sem isolamento ($F_{l,x}$) e a interrompida laranja é da zona com isolamento ($F_{lwi,x}$) em que x é o tabuleiro em questão, T5 ou T7, em a) e b), respetivamente.

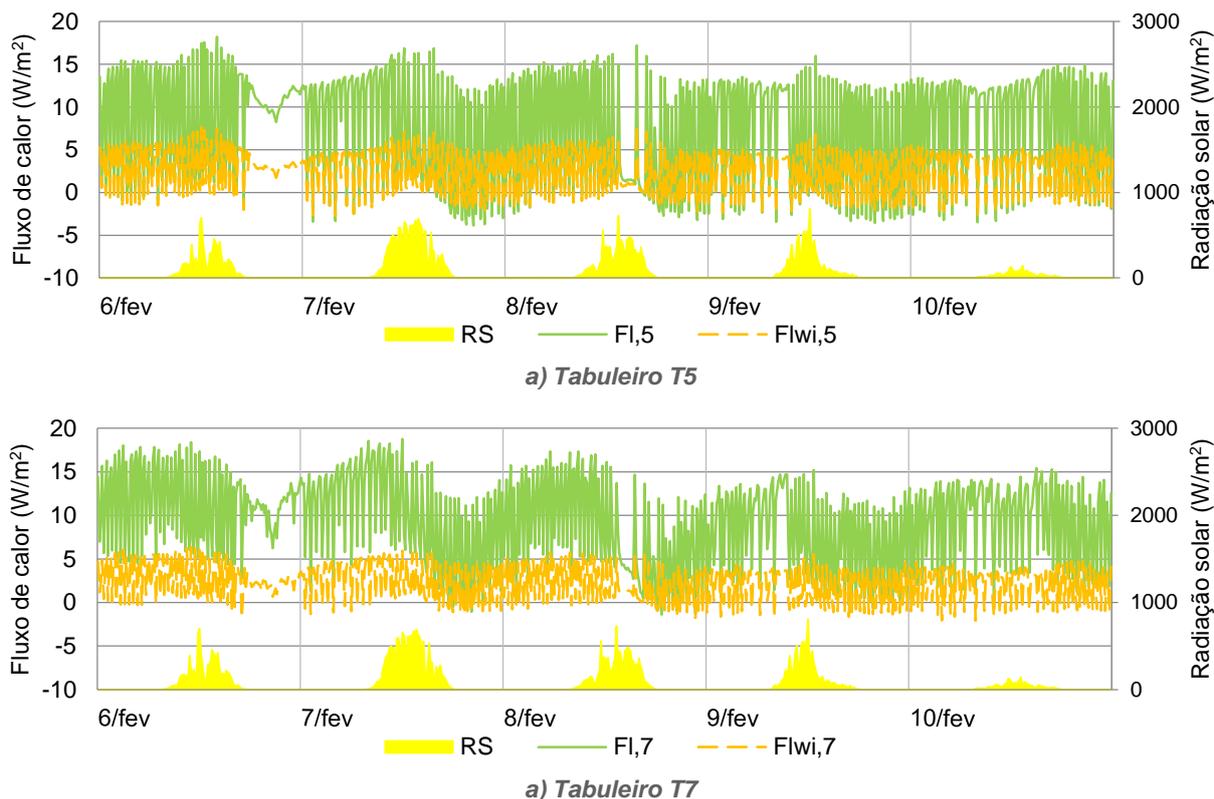


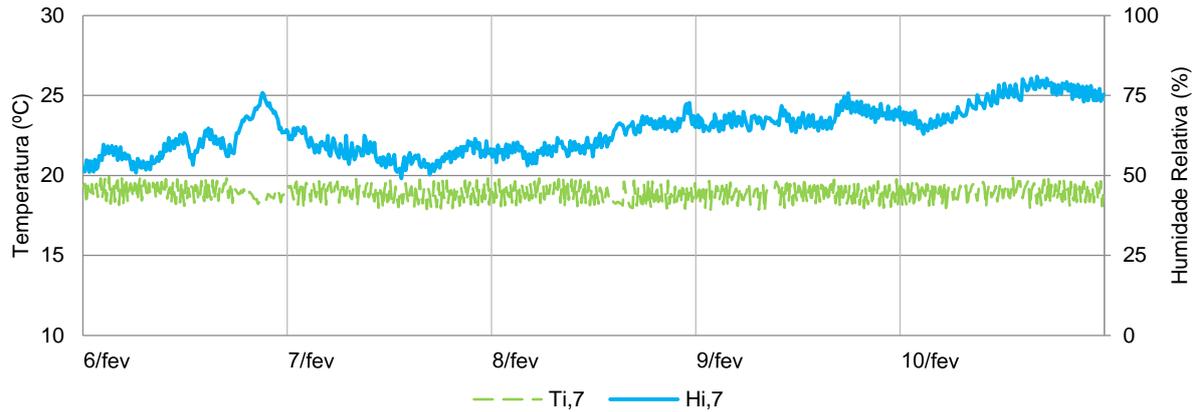
Figura 4.4 - Fluxos de calor no tabuleiro T5 e T7 nas zonas com e sem isolamento e radiação solar da campanha de inverno

Em ambos os tabuleiros, representados na Figura 4.4, é clara uma diferença considerável nos valores das zonas com ou sem isolamento, com os fluxos de calor da zona sem isolamento a atingir valores três vezes superiores aos da zona isolada. O comportamento sinusoidal com amplitudes tão grandes de ambos aconteceu devido à inércia térmica das coberturas verdes. Quando o ambiente interior estava em aquecimento os fluxos subiam e quando parava os fluxos desciam. Durante o aquecimento do compartimento as coberturas armazenavam o calor e quando as lâmpadas desligavam as coberturas libertavam algum calor para o interior .

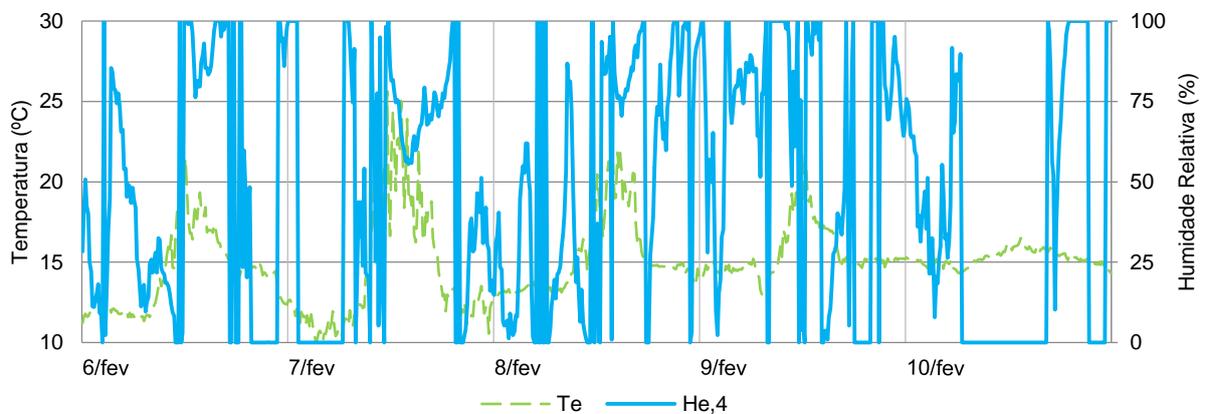
Curiosamente os valores máximos diários dos valores dos fluxos aconteceram quando as temperaturas exteriores eram superiores, sendo também superiores nos dias de maiores temperaturas. Considerou-se a influência do teor de água no solo para justificar este fenómeno mas nesta estação não existia rega e não se encontrou nenhuma relação destes picos com a precipitação que será analisada no subcapítulo relativo à humidade relativa do ar. Põe-se também a hipótese de existir algum efeito devido à radiação solar.

4.2.1.3 Humidade relativa do ar

A Figura 4.5 relaciona a temperatura interiores do tabuleiro T7 ($T_{i,7}$) e a temperatura exterior (T_e) e a humidade (H).



a) Temperatura e humidade relativa no interior do tabuleiro T7



b) Temperatura e humidade relativa no exterior

Figura 4.5 - Temperaturas e humidade relativa da campanha de inverno

Na Figura 4.5 a) observa-se que a temperatura do ambiente interior (climatizado) foi aproximadamente contante enquanto a humidade relativa foi quase sempre crescente. Na Figura 4.6 apresenta-se a precipitação no IST que se assume análoga para o ISA, onde a campanha foi realizada. Nesta figura, o período da campanha está a sombreado. Cruzando os dados de precipitação da Figura 4.6 com valores medidos da Figura 4.5 a), verifica-se que o aumento da humidade relativa coincide com os dias com precipitação ou seja, precipitação mais intensa leva a declives maiores na humidade.

Os dados da humidade na Figura 4.5 b), relativos ao exterior, mostram-se pouco coerentes.

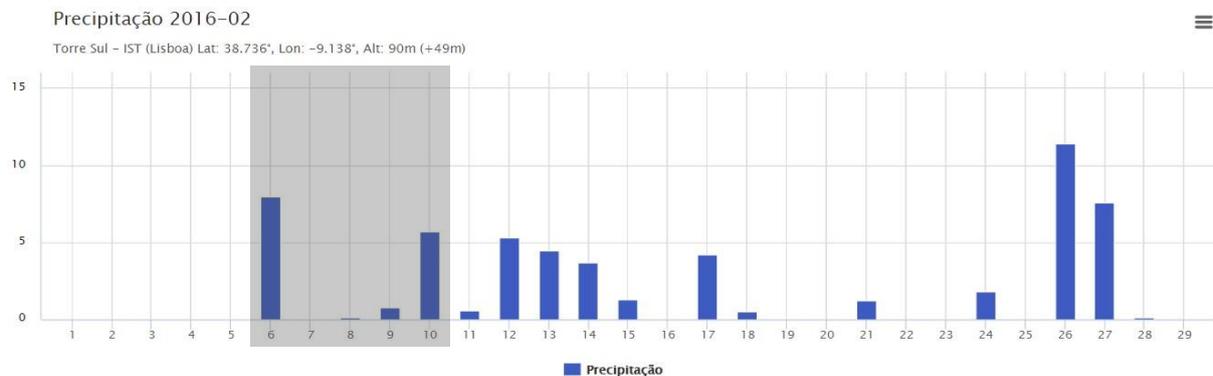


Figura 4.6 - Precipitação referente ao mês de fevereiro [mm] (meteoTécnico)

Para estudar a influência da precipitação nas transferências de calor destas soluções foi utilizada a expressão (4.3) deduzida no capítulo 4.1. Na Figura 4.7 está apresentada graficamente a aplicação desta expressão para os valores Q , medidos pelos fluxímetros, e das temperaturas registadas para o tabuleiro T7. Os valores $U_{,7}$ foram calculados para a zona sem isolamento e $U_{wi,7}$ para a zona sem isolamento. É também apresentada a precipitação acumulada diária, P_d , e a precipitação horária, ambas em milímetros.

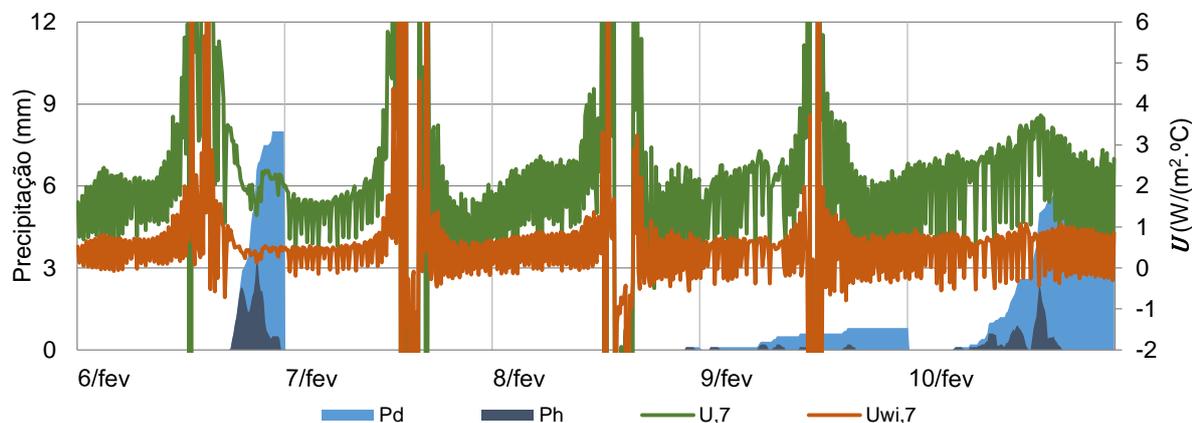


Figura 4.7 - Coeficiente de transmissão térmica e precipitação da campanha de inverno

Embora a expressão devolva valores coerentes quando a diferença de temperaturas é grande, esta dispersa assintoticamente quando o gradiente de temperatura se aproximam de valores nulos, devolvendo resultados pouco exatos.

Ainda assim, verificou-se que existiram aumentos no valor do coeficiente de transmissão térmica quando ocorreu precipitação. Tomando especial atenção ao dia 10, observou-se um aumento do valor do coeficiente na zona sem isolamento quando se registou um período de precipitação intensa. Apesar de se verificar este aumento nos restantes dias devido à aproximação das temperaturas exteriores e interiores, este aumento não se verificou na zona com isolamento. Isto significa que o aumento foi devido à presença de água no substrato proveniente da precipitação.

4.2.1.4 Identificação dos dias tipo

Foram considerados dois dias tipo para a estação de inverno:

- O dia com as temperaturas mais baixas;
- O dia com radiação solar média inferiores.

Os dois dias tipo foram escolhidos com base no conceito de Temperatura Ar-Sol adotando os valores médios diários da temperatura e os valores médios da radiação incidente (durante o dia). A temperatura média diária foi feita para todos os valores recolhidos, o mesmo não faria sentido para a radiação incidente. Os valores nulos recolhidos durante a noite não influenciarem os resultados, que podem ser consultados na Tabela 4.1, onde os valores a **negrito** indicam os valores mínimos de cada coluna.

Tabela 4.1 - Valores estatísticos diários e temperatura Ar-Sol média diária na campanha de inverno

Dia	Te Mínima	Te Média	RS Média	RS Máxima	T _{Ar-Sol} Média
6/fev	11,22	14,25	161	702	19,26
7/fev	10,07	14,35	286	692	23,24
8/fev	12,80	15,35	196	729	21,45
9/fev	12,99	15,61	160	810	20,59
10/fev	14,32	15,26	41	144	16,54

Da Tabela 4.1 destacam-se os dias 7 e 10 de fevereiro (com retângulos) que representam o dia de menores temperaturas e menores radiações solares, respetivamente. Coincidentemente o dia 7 é também o dia com maior radiação solar. Denomina-se o dia 7 de fevereiro como D+F (dia mais frio) e o dia 10 de fevereiro como D<RS (dia de menor radiação solar)

De seguida apresenta-se a análise do D<RS seguida da análise do D+F.

4.2.2 Dia de menor radiação solar (D<RS)

Na Tabela 4.2 apresentam-se valores estatísticos de todas as grandezas recolhidos durante a campanha para este dia, D<RS. Nela são indicados os valores máximos, mínimos e médios de cada parâmetro monitorizado durante a campanha.

Tabela 4.2 - Valores máximos, médios e mínimos de temperaturas, fluxos e radiação no D<RS

			Valor			
			Médio	Máximo	Mínimo	
Temperatura (°C)	Exterior		Te	15,26	16,49	14,32
	T3	Sem isolamento	Tse,3	14,99	16,44	13,85
			Th1,3	15,27	16,45	14,41
			Th2,3	15,22	16,13	14,53
			Tsi,3	15,03	15,52	14,44
		Com isolamento	Tsewi,3	14,92	16,44	13,62
			Th1wi,3	15,04	15,71	14,32
			Th2wi,3	15,01	15,64	14,36
			Tsiwi,3	14,99	15,49	14,35
	Interior		Ti,3	14,63	15,13	14,13
	T5	Sem isolamento	Tse,5	15,28	16,31	14,47
			Th1,5	16,54	17,06	16,02
			Th2,5	17,17	17,68	16,70
			Tsi,5	20,07	21,11	18,95
		Com isolamento	Tsewi,5	15,89	19,45	14,03
			Th1wi,5	15,79	16,36	14,72
			Th2wi,5	16,28	16,52	15,97
			Tsiwi,5	18,73	20,16	15,10
	Interior		Ti,5	19,52	20,53	18,13
	T6	Sem isolamento	Tse,6	14,79	16,07	13,72
			Th1,6	16,59	17,43	15,72
			Th2,6	18,04	18,46	17,57
			Tsi,6	19,97	20,84	19,03
		Com isolamento	Tsewi,6	14,75	15,77	13,91
			Th1wi,6	14,78	15,72	13,95
			Th2wi,6	16,13	16,56	15,49
			Tsiwi,6	19,59	20,61	18,30
	Interior		Ti,6	20,07	21,09	18,79
T7	Sem isolamento	Tse,7	15,58	16,77	14,45	
		Th1,7	16,65	17,11	16,18	
		Th2,7	17,61	17,87	17,33	
		Tsi,7	19,21	19,85	18,41	
	Com isolamento	Tsewi,7	15,08	16,15	14,20	
		Th1wi,7	15,84	16,48	15,23	
		Th2wi,7	16,15	16,64	15,70	
		Tsiwi,7	18,85	19,39	18,05	
Interior		Ti,7	18,98	19,87	17,69	
Fluxo de calor	T5	Sem isolamento	Fl,5	8,17	14,94	-3,49
		Com isolamento	Flwi,5	2,65	5,94	-2,79
	T7	Sem isolamento	Fl,7	9,44	15,43	0,73
		Com isolamento	Flwi,7	2,10	4,78	-2,09
Radiação solar (W/m ²)			RS	18,69	143,60	-0,12

4.2.2.1 Temperaturas interiores e da superfície exterior de todos os tabuleiros

Na Figura 4.8 estão representados os gráficos que relacionam as temperaturas interiores de todos os tabuleiros com as temperaturas exteriores, superficiais e ambiente, e radiação solar. Na Figura 4.8 a) estão as temperaturas do ambiente interior (Ti,x) de todos os tabuleiros (Tx) e a temperatura exterior. Em b) estão representadas todas as temperaturas das superfícies exteriores (Tse,x).

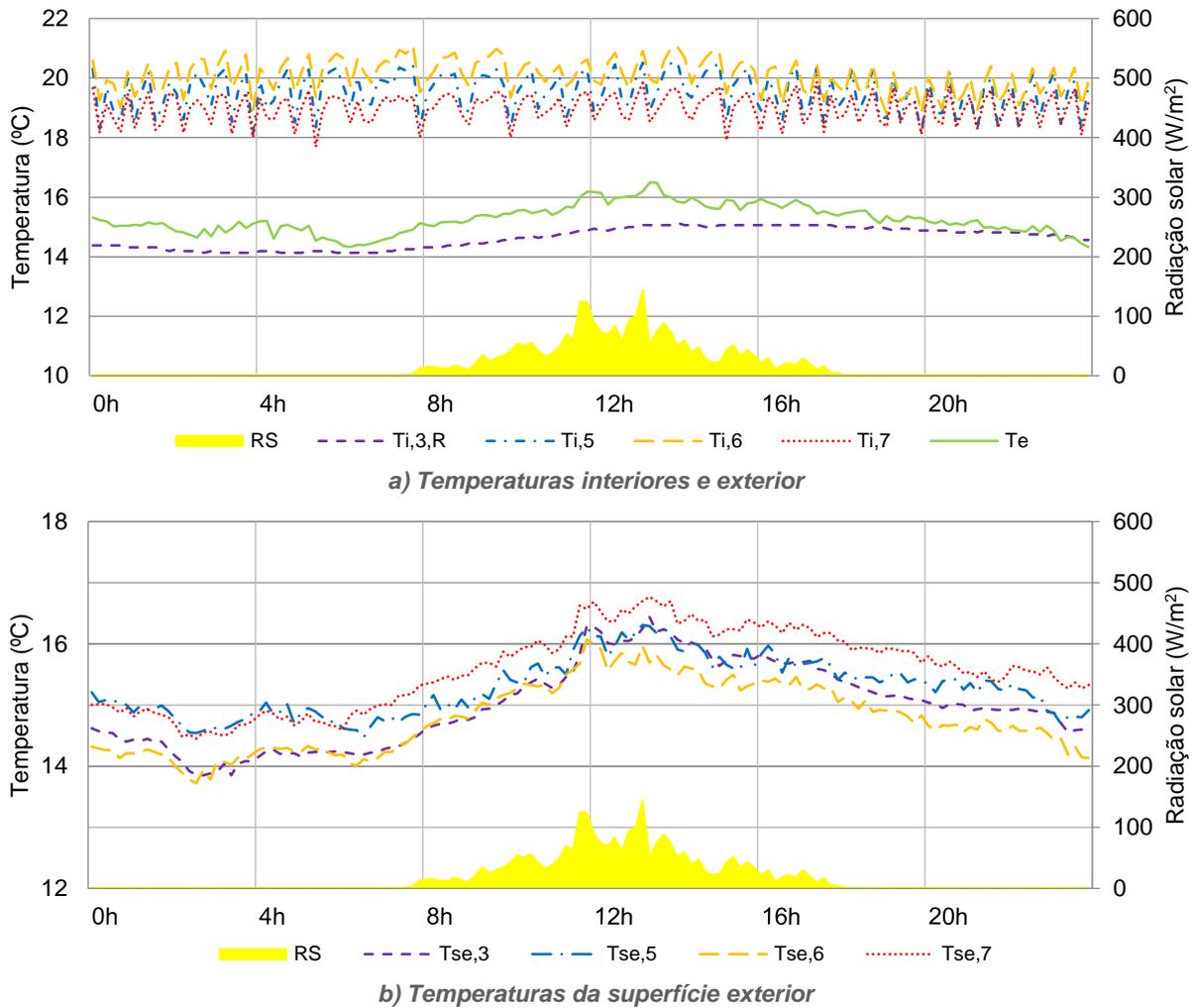


Figura 4.8 - Temperaturas de todos os tabuleiros e radiação solar no D<RS

Analisando a Figura 4.8 a) ou a Tabela 4.2 verifica-se que a temperatura exterior foi estável durante todo o dia, com um valor médio diário de 15,26°C, um máximo de 1,23°C superior ao valor médio e um mínimo de 0,91° abaixo do médio. Este valor é pouco representativo da estação, sendo cerca de 5°C superior à média histórica do mês de fevereiro em Portugal continental (Boletim Climatológico Fevereiro 2016 IPMA, 2016).

A radiação solar medida foi muito reduzida, atingindo um máximo de 143,60W/m² às 13h10 e uma média de 18,69W/m². Constatou-se também que o compartimento do tabuleiro T6 esteve mais quente durante o D<RS, com uma média 0,5°C superior à do tabuleiro T5, que foi o segundo mais quente, também por cerca de 0,5°C. As temperaturas interiores foram sempre superiores às exteriores. As diferenças entre tabuleiros resultam da ação do vento, conforme já foi discutido na análise geral da campanha (secção 4.2.1).

Ao contrário do que acontece no interior, verifica-se que durante o dia a superfície exterior do tabuleiro T7 é superior às restantes (Figura 4.8 b)). É de notar que a Tse do tabuleiro T3 (não aquecido) é também superior aos restantes tabuleiros, nomeadamente T5 e T6. O tabuleiro T6 foi o que em média se manteve com menor temperatura superficial exterior.

Conclui-se então para cada tabuleiro:

- T3 - apesar de a sua climatização não ter sido possível, este tabuleiro manteve a sua temperatura aproximadamente constante, entre os 14 e 15°C, apresentando bons resultados. A presença de braquipódio mais denso ajuda este tabuleiro a manter a temperatura superficial e a acumular a energia recebida através da radiação solar, como também se verificou no tabuleiro T7;
- T5 - este tabuleiro foi o que teve menores variações na sua Tse e esteve sempre próximo das temperaturas interiores do T6 apesar de estar mais desprotegido do vento. Isto leva a crer que o seu desempenho térmico é mais favorável comparando com o T6. A presença do musgo parece dificultar as transferências de calor entre o exterior e o interior. Também se observaram ganhos solares mais reduzidos que podem ser consequência quer do musgo ou do sombreamento por parte do rosmaninho;
- T6 - este é o tabuleiro que perde mais energia pela cobertura. O gradiente de temperatura entre a zona mais profunda do substrato e a superfície exterior é o mais elevado (cerca de 3°C) em comparação com os restantes tabuleiros (que rondam os 2°C). É de notar que o tabuleiro T6 apresentou as temperaturas interiores mais quentes, em média, e as temperaturas superficiais exteriores mais baixas. O alecrim, que é uma planta alta e pouco densa, deixa a superfície do terreno muito exposta e causa pouco sombreamento, contribuindo para uma dissipação de calor mais rápida;
- T7 - este tabuleiro apresenta um comportamento da superfície exterior muito semelhante, ao do tabuleiro T3, que tem a mesma vegetação mas solo diferente. Por ser climatizado, observa-se uma temperatura superficial exterior cerca de 0,5°C (em média) em relação à do tabuleiro T3. Devidas à maior exposição ao vento, verificam-se temperaturas interiores mais baixas e temperaturas superficiais exteriores mais altas. O braquipódio revela-se como um bom acumulador de temperatura por ser denso e proteger a superfície do solo, mesmo no tabuleiro T3 que não era climatizado. Dado que não foi possível climatizar o tabuleiro T3, não é possível comparar a influência dos substratos.

Em conclusão, verifica-se que a vegetação das coberturas verdes tem influência no desempenho térmico destas soluções durante a estação de inverno: quanto mais densa e rasteira a vegetação, maior é a proteção do solo aos agentes climatéricos e menores são as transferências de calor. Durante o dia, uma vegetação mais densa contribui para manter melhor os ganhos solares na superfície exterior.

4.2.2.2 Fluxos de calor

Para completar as observações anteriores estuda-se a Figura 4.9 onde são apresentados os fluxos dos tabuleiros T5 e T7 (Tx) nas zonas com e sem isolamento térmico ($Fl_{wi,x}$ e $Fl_{i,x}$, respetivamente) durante o $D < RS$.

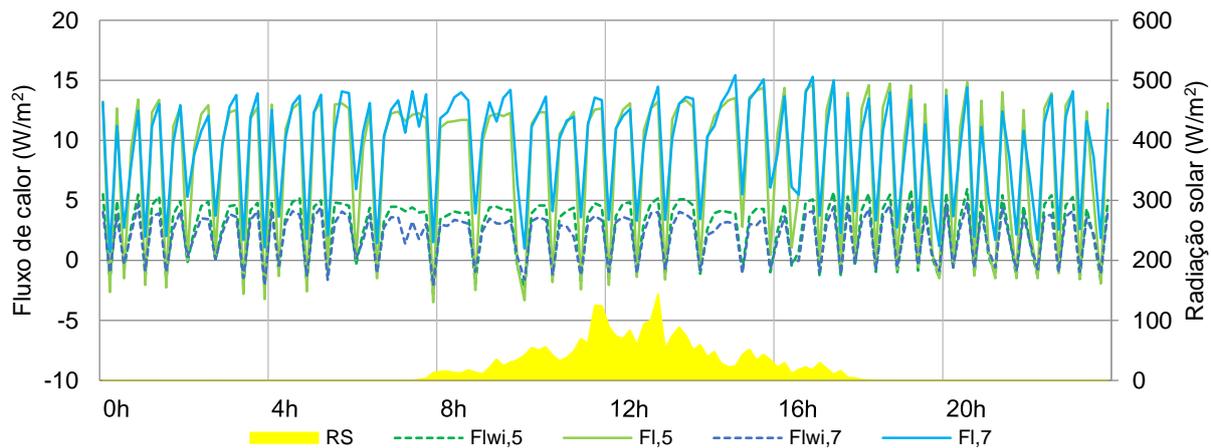


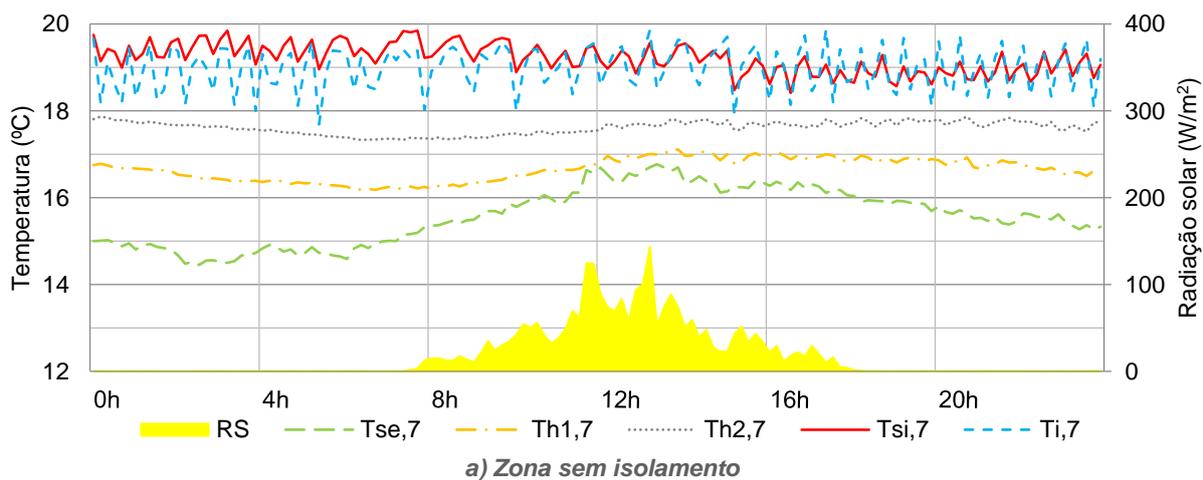
Figura 4.9 - Fluxos de calor dos tabuleiros T5 e T7 e radiação solar no $D < RS$

Observando a Figura 4.9 e analisando a Tabela 4.2 constata-se que os fluxos no tabuleiro T7 são superiores aos do tabuleiro T5 na zona sem isolamento e inferiores na zona com isolamento. Os picos máximos de ambos, na zona sem isolamento, mantiveram-se entre os 10 e 15W/m². No entanto, durante a noite o tabuleiro T5 mostra picos máximos superiores. Na zona isolada os fluxos foram muito inferiores, com o Flwi,5 cerca de 5W/m² e Flwi,7 abaixo dos 5W/m².

Os dados da análise do fluxo mostram diferenças face aos resultados obtidos pelas diferenças de temperaturas, mas sem grande expressão. Tal pode dever-se à distância às lâmpadas, que não era exatamente a mesma.

4.2.2.3 Temperaturas do substrato

A Figura 4.10 mostra a variação das temperaturas a diferentes profundidades do tabuleiro T7, para a zona sem isolamento em a) e com isolamento em b).



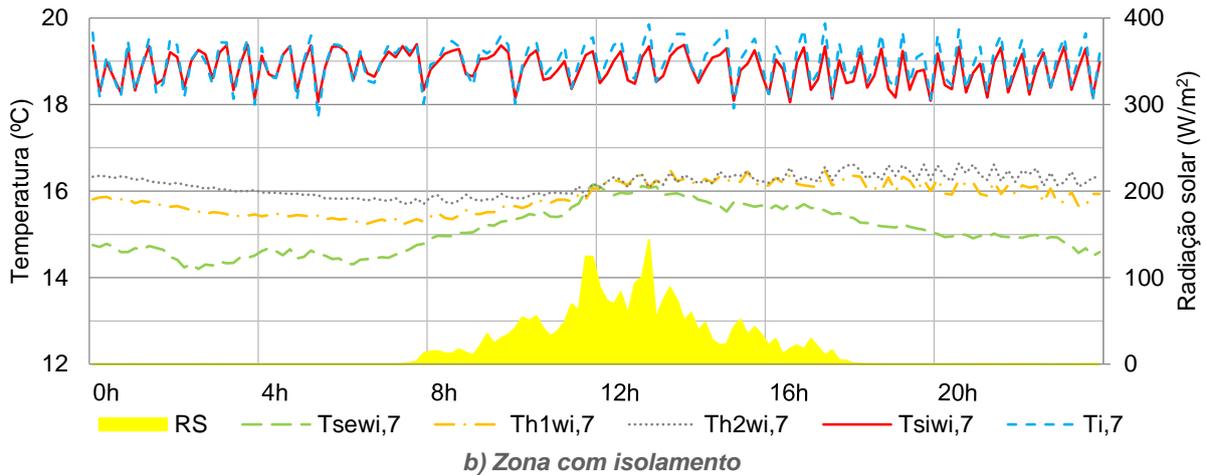


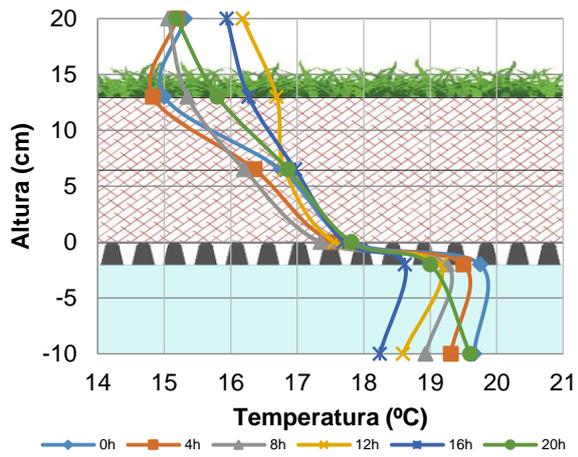
Figura 4.10 - Temperatura do substrato do tabuleiro T7 e radiação solar no D<RS

A zona sem isolamento, Figura 4.10 a), apresenta as temperaturas a cada profundidade intervaladas, existindo sempre algumas diferenças entre os valores de cada profundidade. Os valores das temperaturas aumentam em direção ao interior do tabuleiro. Observa-se que a temperatura da superfície interior é tipicamente superior à do ambiente na primeira metade do dia e mais semelhante na segunda metade, embora ambas se mantivessem praticamente sempre dentro do intervalo entre os 18 e os 20°C, dado que o compartimento estava a ser climatizado. As oscilações das temperaturas foram menos acentuadas na superfície interior do que no ambiente interior. As diferentes amplitudes são justificadas pela contribuição do solo em contacto com a superfície, devido à inércia térmica do substrato. O facto das temperaturas superficiais interiores serem mais altas do que as do ambiente dever-se à proximidade da lâmpada, que aquece a superfície por radiação. No substrato, quanto mais profundo menores eram as variações de temperatura.

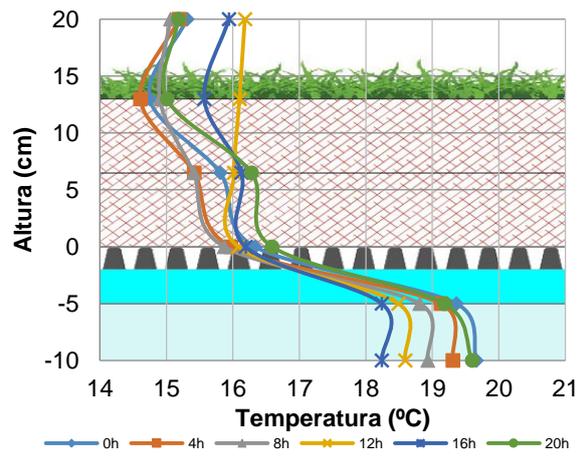
Na Figura 4.10 b) observa-se menos dispersão das temperaturas do substrato para a zona com isolamento. As temperaturas do substrato estiveram também mais distantes das temperaturas do interior, tomando valores mais próximos das temperaturas exteriores. Neste caso, o andamento da temperatura da superfície interior é semelhante ao da temperatura do ambiente, com valores ligeiramente inferiores. Isto deve-se ao facto da superfície não estar em contacto com o solo que ameniza as diferenças de temperatura e por esta superfície estar mais distante da fonte de calor.

4.2.2.4 Perfis dos tabuleiros

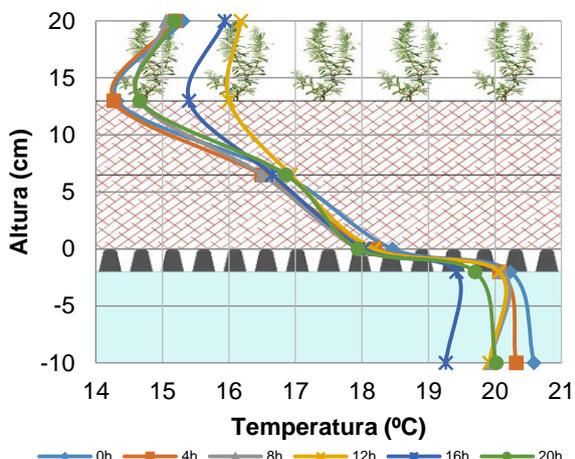
Na Figura 4.11 encontram-se os perfis de todos os tabuleiros demonstrando o gradiente térmico em profundidade para o D<RS, como explicado no subcapítulo 4.1. Apresentam-se os perfis ay), by), cy) e dy) para os tabuleiros T7, T6, T5 e T3, nas zonas com e sem isolamento térmico.



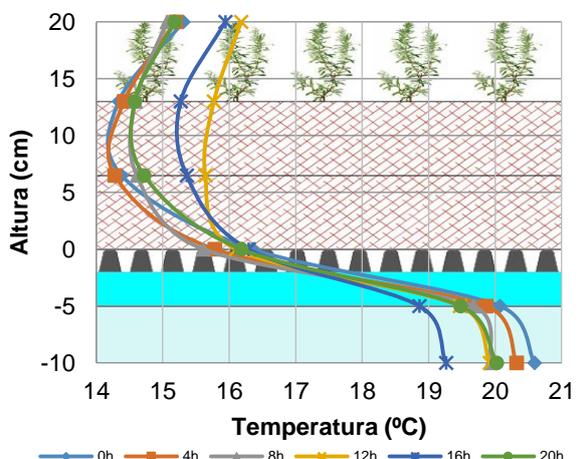
a1) Tabuleiro T7 s/isolamento



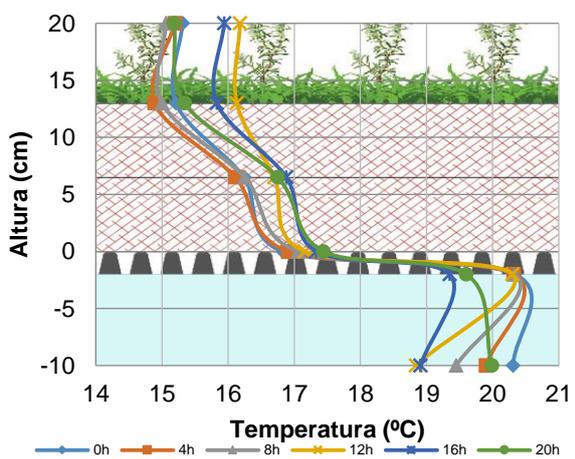
a2) Tabuleiro T7 c/isolamento



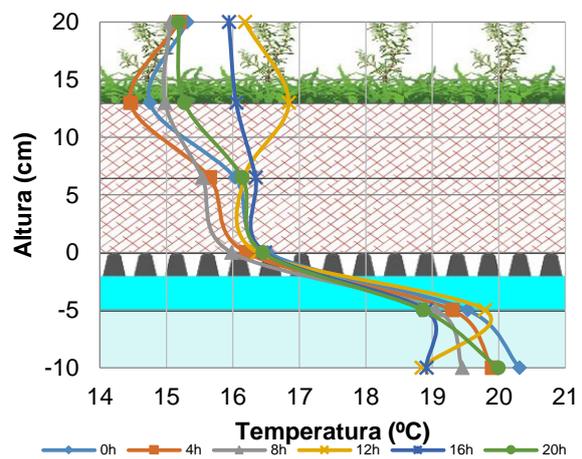
b1) Tabuleiro T6 s/isolamento



b2) Tabuleiro T6 c/isolamento



c1) Tabuleiro T5 s/isolamento



c2) Tabuleiro T5 c/isolamento

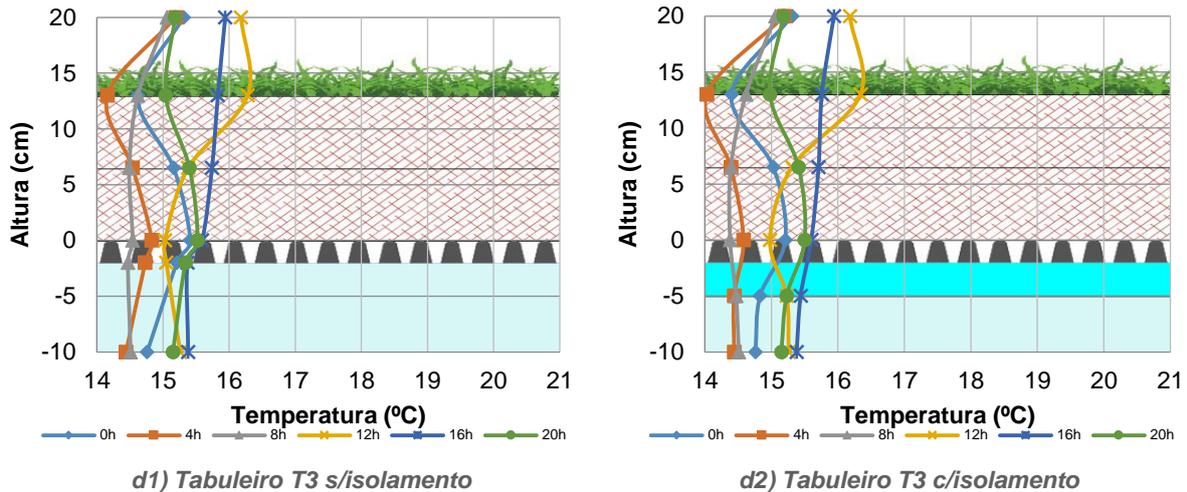


Figura 4.11 - Gradiente de temperatura em profundidade dos tabuleiros no $D < R_S$

Verifica-se que os tabuleiros apresentam perfis semelhantes entre si conforme tenham ou não isolamento. A única exceção é a do tabuleiro T3, que não estava climatizado

Verificam-se algumas semelhanças entre zonas de cada tabuleiro, com e sem isolamento, nomeadamente:

- Na zona sem isolamento térmico os tabuleiros mostram um desenvolvimento quase linear entre os valores de temperatura superficial, o que não se verifica na zona com isolamento, onde existe uma quebra repentina da temperatura;
- As temperaturas a meia altura ($Th_1 - 6,5\text{cm}$) indicam uma amplitude média de apenas 1°C , com tendência a acompanhar a temperatura exterior, e são mais próximas na zona sem isolamento;
- As temperaturas da superfície exterior apresentam maiores amplitudes, em média 2°C , e são geralmente mais reduzidas na zona sem isolamento, atingindo temperaturas inferiores às do ambiente exterior em todos os períodos no tabuleiro T6.

Concluiu-se que a utilização de isolamento térmico contribui fortemente para o desempenho térmico das coberturas verdes em análise. Por outro lado, a amplitude térmica diminui em profundidade, o que indica que estas soluções têm uma inércia térmica significativa. É de notar ainda que o tabuleiro T3 tem um comportamento mais variado nos diferentes períodos do dia por ser apenas influenciado pelo exterior, não existindo contribuição da climatização.

4.2.3 Dia mais frio (D+F)

Na Tabela 4.3 apresentam-se os valores das grandezas recolhidas durante a campanha para o dia mais frio, D+F. Nela estão indicados os valores máximos, mínimos e médios de cada parâmetro monitorizado durante a campanha.

Tabela 4.3 - Valores máximos, médios e mínimos de temperaturas, fluxos e radiação no D+F

			Valor					
			Médio	Máximo	Mínimo			
Temperatura (°C)	Exterior		Te,4,T	13,20	20,07	9,62		
			Tse,3	13,91	22,00	10,11		
	T3	Sem isolamento		Th1,3	13,71	16,90	11,23	
				Th2,3	13,46	15,64	11,02	
				Tsi,3	13,54	15,56	11,54	
				Tsewi,3	13,17	19,65	9,77	
		Com isolamento		Th1wi,3	13,23	15,42	10,99	
				Th2wi,3	13,32	15,31	11,21	
				Tsiwi,3	13,27	15,38	11,22	
				Ti,3	12,91	14,75	11,19	
	T5	Sem isolamento		Tse,5	15,38	25,00	11,21	
				Th1,5	16,04	19,39	13,59	
				Th2,5	16,63	18,61	14,73	
				Tsi,5	19,21	20,61	18,10	
		Com isolamento		Tsewi,5	14,13	21,56	10,46	
				Th1wi,5	14,87	16,77	12,87	
				Th2wi,5	15,20	16,66	13,68	
				Tsiwi,5	18,48	19,45	17,62	
			Ti,5	18,79	20,29	17,29		
		T6	Sem isolamento		Tse,6	14,06	28,19	9,53
					Th1,6	15,76	18,48	13,55
					Th2,6	17,27	18,55	15,95
				Tsi,6	19,21	20,67	18,00	
	Com isolamento			Tsewi,6	13,61	21,86	9,43	
				Th1wi,6	13,31	22,10	10,25	
				Th2wi,6	14,95	16,17	13,48	
				Tsiwi,6	18,84	20,17	17,59	
			Ti,6	19,43	20,70	18,16		
T7	Sem isolamento			Tse,7	14,58	22,16	11,00	
			Th1,7	15,95	18,32	14,10		
			Th2,7	16,98	18,03	15,85		
			Tsi,7	18,99	20,01	17,52		
	Com isolamento		Tsewi,7	14,35	23,90	10,22		
			Th1wi,7	15,00	18,17	12,40		
			Th2wi,7	15,30	17,07	13,42		
			Tsiwi,7	18,66	19,46	17,76		
		Ti,7	18,92	19,82	17,91			
	Fluxo de calor (W/m ²)	T5	Sem isolamento	Fl,5	7,37	16,87	-3,86	
Com isolamento			Flwi,5	2,52	7,19	-2,73		
T7		Sem isolamento	Fl,7	9,94	18,77	-1,06		
		Com isolamento	Flwi,7	2,58	5,94	-1,37		
Radiação solar (W/m ²)			RS	133,16	691,50	-0,12		

4.2.3.1 Temperaturas interiores e da superfície exterior de todos os tabuleiros

Os gráficos da Figura 4.12 apresentam as temperaturas de todos os tabuleiros com as temperaturas exteriores e radiação solar para o D+F. Na Figura 4.12 a) estão as temperaturas do ambiente interior (Ti,x) de todos os tabuleiros (Tx) e a temperatura exterior. Na Figura 4.12 b) estão representadas as temperaturas das superfícies exteriores (Tse,x).

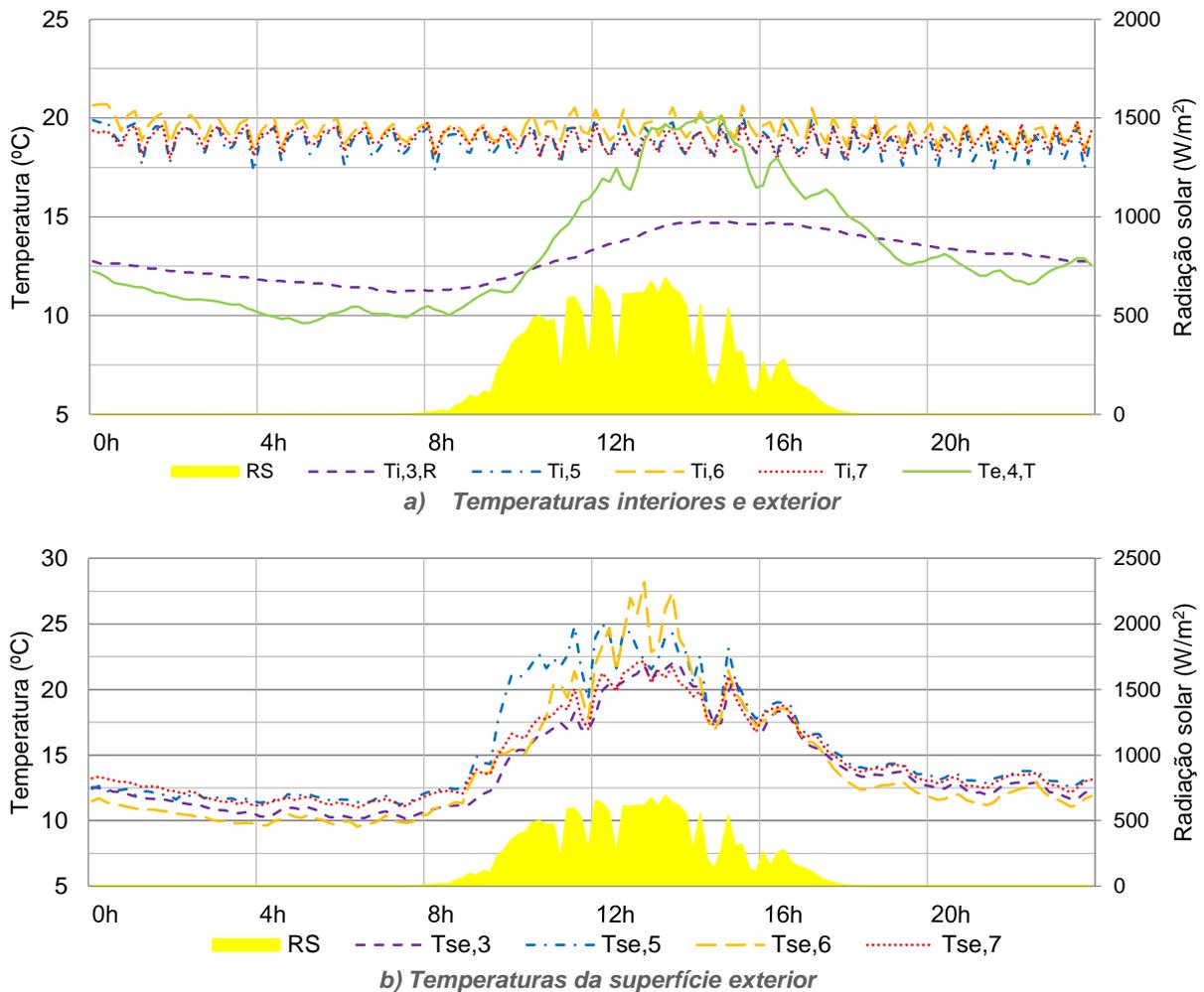


Figura 4.12 - Temperaturas de todos os tabuleiros e radiação solar no D+F

Os dados da Figura 4.12 e da Tabela 4.3 revelam de novo que as temperaturas exteriores e a radiação solar atingiram valores elevados pouco característicos do mês de fevereiro. No entanto os valores médios já se encontram mais próximos da média histórica registada em Portugal continental, com 3°C de diferença (Boletim Climatológico Fevereiro 2016 IPMA, 2016).

A Figura 4.12 a) mostra que as temperaturas interiores se mantiveram muito próximas mantendo-se o tabuleiro T6 mais quente e com os tabuleiros T7 e T5 com perfis semelhantes. Para temperaturas exteriores superiores, verifica-se uma tendência de as temperaturas interiores serem também superiores, embora com pouca expressão.

Na Figura 4.12 b) verificou-se que as temperaturas da superfície exterior do tabuleiro T5 tiveram um aquecimento mais rápido e com valores altos. O tabuleiro T6 foi o que teve temperaturas superficiais exteriores mais elevadas atingindo os 28,19°C. Durante o período noturno, os tabuleiros T7 e T5 mantiveram-se mais quentes, ao contrário do tabuleiro T6. O comportamento da superfície exterior dos tabuleiros T3 e T7 foi semelhante.

Com esta análise pode-se concluir:

- T3 - uma vez que a vegetação deste tabuleiro é semelhante à do tabuleiro T7, seria de esperar que os registos das temperaturas das superfícies exteriores fossem semelhantes. As diferenças resultam da climatização do tabuleiro T7. O braquipódio, sendo uma vegetação densa, reduz os ganhos solares obtidos por ambos os tabuleiros, o que não é benéfico nesta estação do ano;
- T5 - esta solução apresentou ganhos mais elevados, com um coeficiente de absorção semelhante ao do tabuleiro T6 (0,86 – ver Tabela 3.5). No entanto, este reteve melhor a temperatura durante a noite, o que é vantajoso para esta estação do ano. A presença de musgo aparenta ser o fator que melhor justifica este comportamento, devido à sua cor escura e ao seu efeito de isolamento. No entanto, esta solução não se mostra tão vantajosa como a solução dos tabuleiros T3 e T7;
- T6 - também com ganhos solares elevados, este tabuleiro é menos eficaz a manter a temperatura durante o período noturno, essencialmente por a vegetação instalada ser pouco densa e alta, permitindo que a temperatura se dissipe facilmente. Os ganhos solares também se dissiparam facilmente porque a vegetação não oferece proteção ao vento;
- T7 - apesar das temperaturas superficiais exteriores terem sido as mais reduzidas quando comparadas aos outros tabuleiros aquecidos durante o dia, foram as mais elevadas durante a noite, em conjunto com as do tabuleiro T5. As temperaturas interiores foram muito semelhantes às do tabuleiro T5 que teve ganhos solares maiores e foi menos afetado pelo vento, que neste dia teve pouca intensidade (Figura 4.2).

Como verificado no D<RS, confirmou-se que os ganhos solares neste tipo de cobertura não têm influência significativa no comportamento térmico das coberturas verdes nesta estação do ano. No D<RS as diferenças de temperatura interior são superiores às do D+F, que foi também o que teve maior radiação solar, sendo esta diferença justificada pela influência do vento, que tem maior intensidade no D<RS. Em ambos os casos a utilização de uma vegetação mais densa devolveu melhores resultados pois oferece uma proteção extra ao ambiente exterior.

4.2.3.2 Fluxos de calor

A Figura 4.13 apresenta os fluxos de calor dos tabuleiros T5 e T7 (Tx) nas zonas com e sem isolamento térmico ($Fl_{wi,x}$ e $Fl_{i,x}$, respetivamente) durante o D+F.

Na Figura 4.13 observou-se que os fluxos de calor registados nas zonas sem isolamento foram superiores aos da zona com isolamento, com valores médios superiores para o tabuleiro T7 em ambas as zonas. Verifica-se também que os valores dos fluxos foram superiores durante as primeiras horas do dia na zona sem isolamento e durante a tarde na zona com isolamento. Perto das 20h, observa-se uma depressão no fluxo mas não foi possível identificar o agente que a possa ter causado.

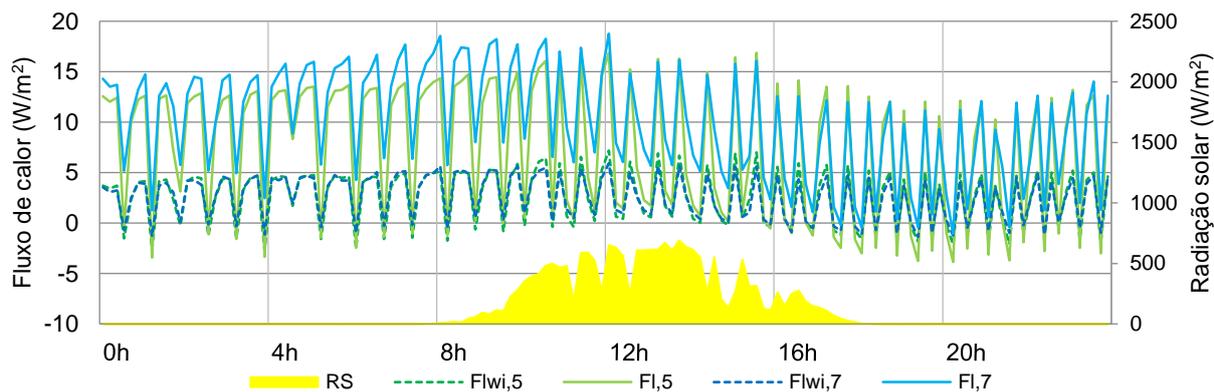


Figura 4.13 - Fluxos de calor dos tabuleiros T5 e T7 e radiação solar no D+F

Tal como referido anteriormente, verifica-se que os fluxos de calor não estiveram em concordância com as conclusões retiradas pela análise das temperaturas, embora com desvios muito reduzidos pois os valores estiveram muito próximos. Este facto pode estar associado à falta de alinhamento dos fluxímetros ou à proximidade com as lâmpadas.

4.2.3.3 Temperaturas do substrato

Na Figura 4.14 apresenta-se as temperaturas das diferentes profundidades do substrato nas zonas do tabuleiro T7, sem isolamento em a) e com isolamento em b), para o D+F. Estão também representadas a temperatura interior e a radiação solar.

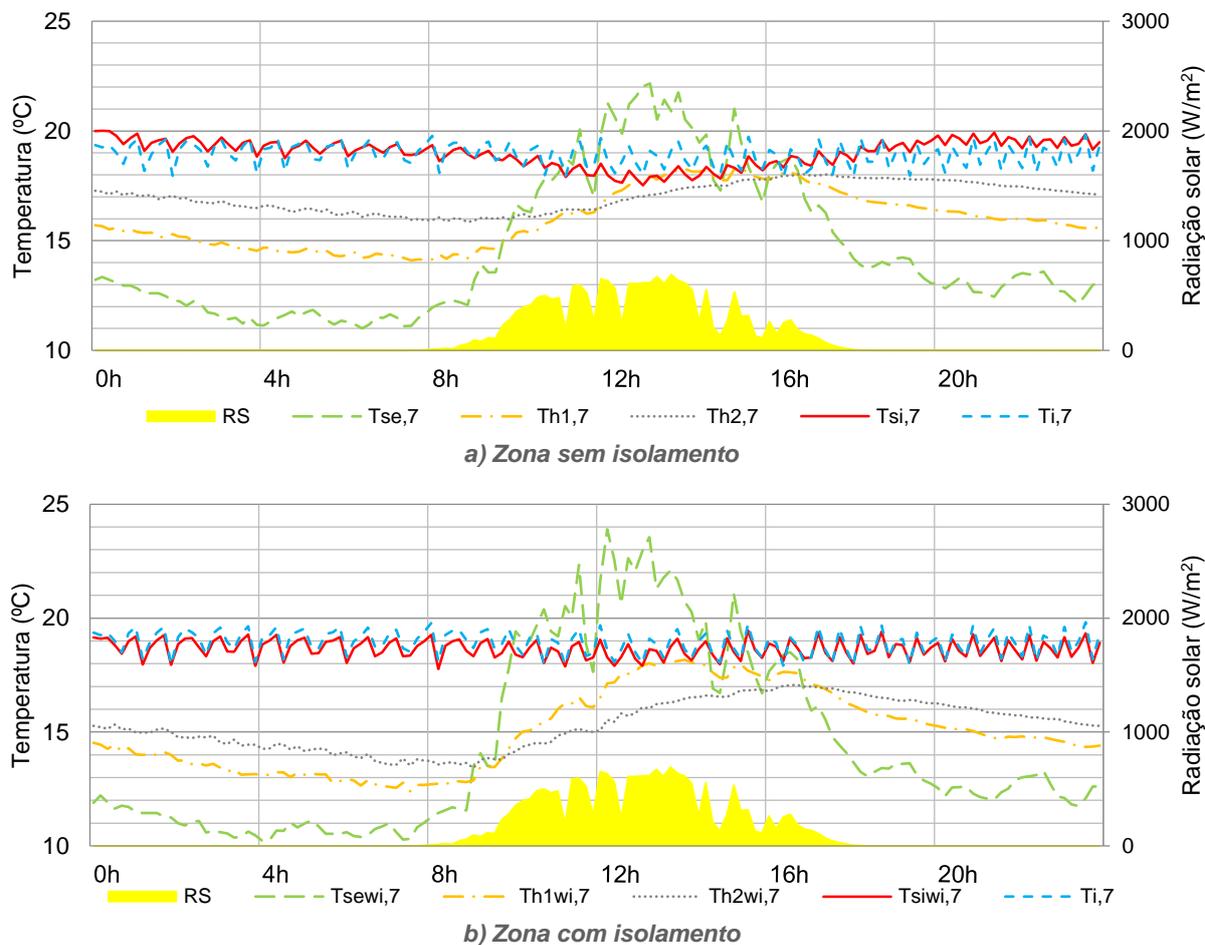
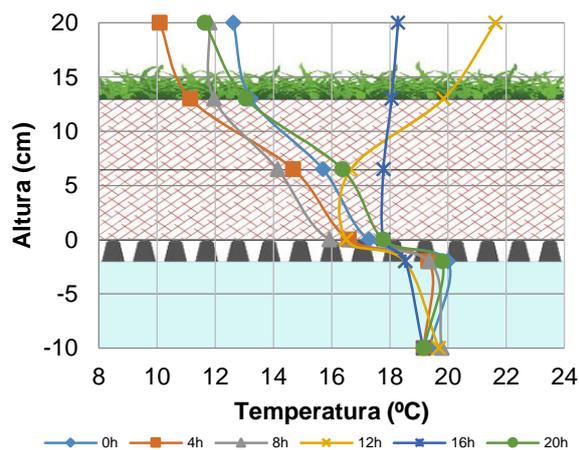


Figura 4.14 - Temperatura do substrato do tabuleiro T7 e radiação solar no D+F

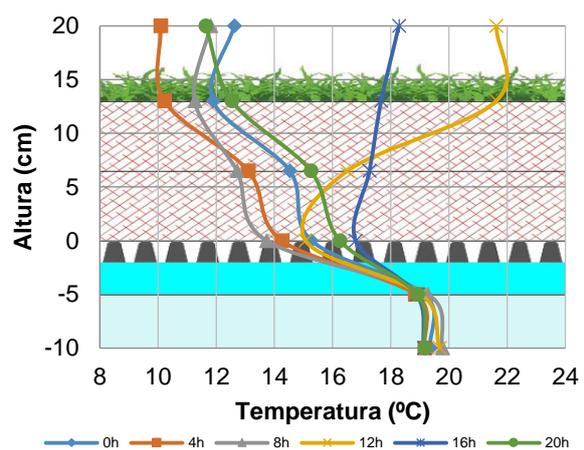
A Figura 4.14 indica que em ambas as zonas, durante a noite, a temperatura aumenta com a profundidade, tendo a temperatura máxima sido verificada no ambiente interior, exceto na zona sem isolamento onde, por influência das lâmpadas que faziam o aquecimento, a superfície teve temperaturas superiores às do ambiente interior. Durante o dia, a radiação solar promove o aquecimento das camadas superiores do substrato. Com o arrefecimento noturno, observa-se que quanto maior a profundidade, menor amplitude térmica. Naturalmente, a zona sem isolamento é mais afetada pelo ambiente interior resultando em temperaturas semelhantes (às 16h tinham todas valores muito próximos). Na zona com isolamento, as amplitudes são superiores nas camadas mais superficiais, pois durante a noite atingem valores mais reduzidos por não receberem calor do interior. As diferenças nos valores máximos da temperatura exterior devem-se à vegetação e ao seu sombreamento.

4.2.3.4 Perfis dos tabuleiros

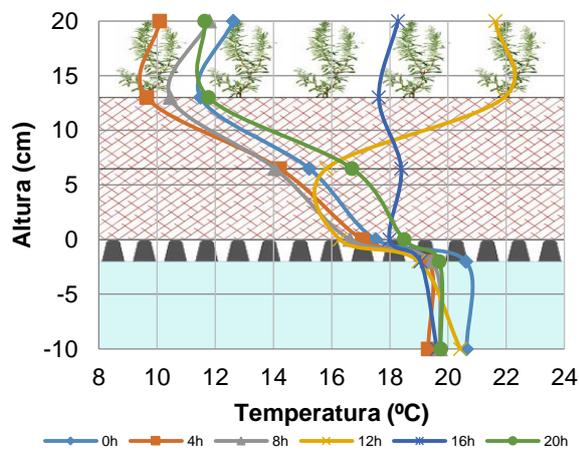
Na Figura 4.15 encontram-se os perfis de todos os tabuleiros demonstrando o gradiente térmico em profundidade como explicado no subcapítulo 4.1.



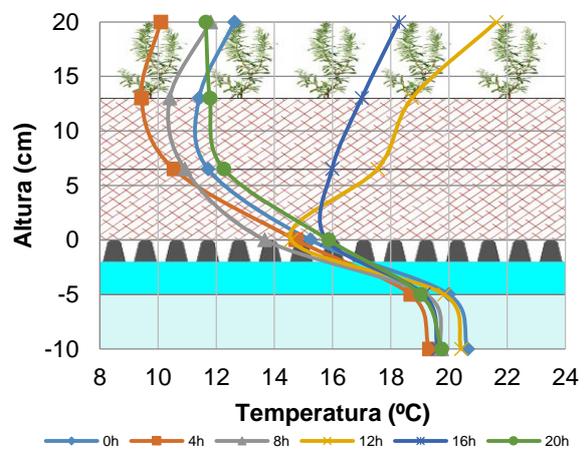
a1) Tabuleiro T7 s/isolamento



a2) Tabuleiro T7 c/isolamento



b1) Tabuleiro T6 s/isolamento



b2) Tabuleiro T6 c/isolamento

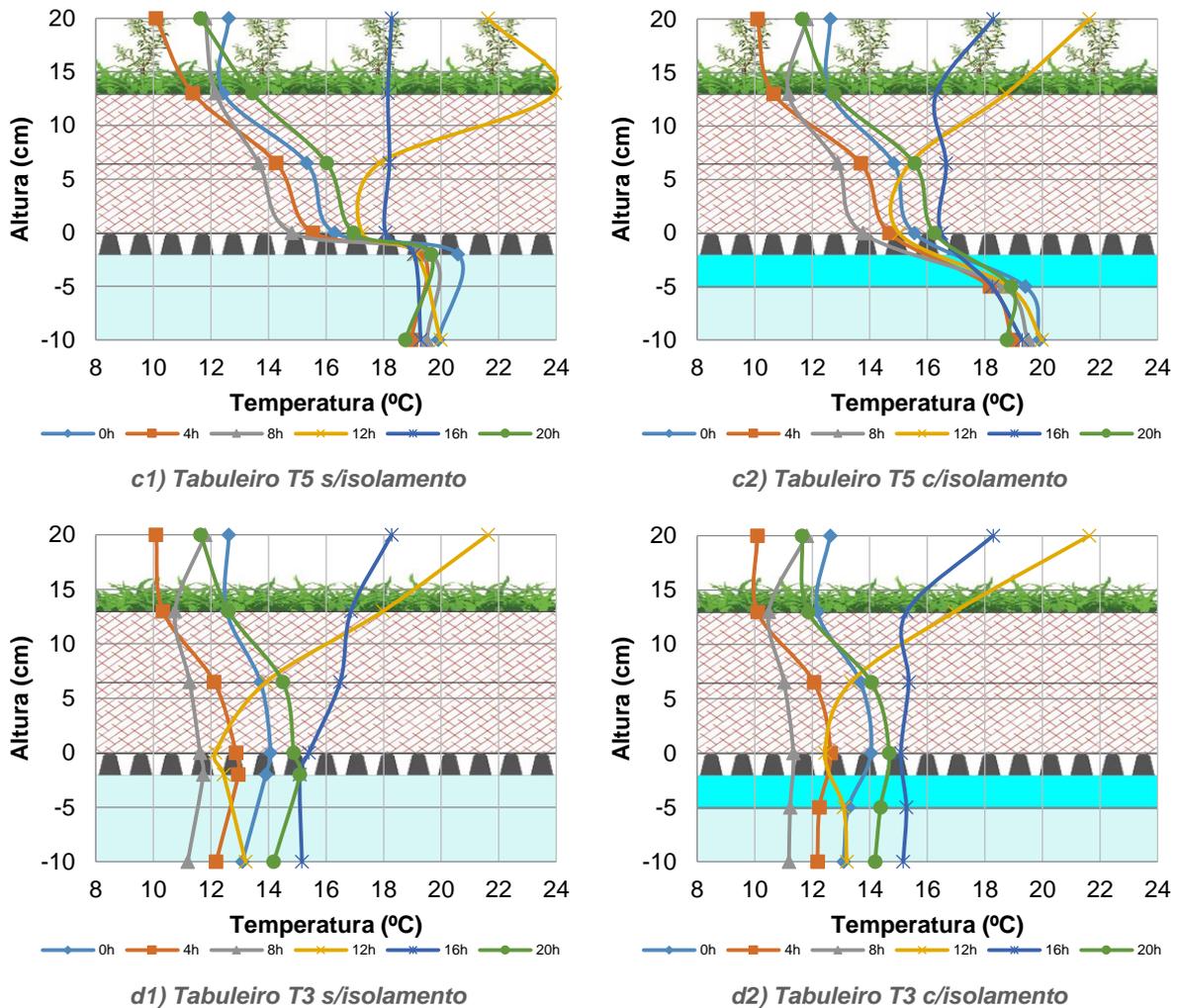


Figura 4.15 - Gradiente de temperatura em profundidade dos tabuleiros no D+F

Pôde-se verificar na Figura 4.15 que a amplitude térmica diminui com a profundidade em todos os tabuleiros, exceto no T3 que não foi climatizado. As diferenças entre zonas foram muito semelhantes às observadas no D<RS mas com amplitudes mais elevadas devidas à radiação solar e às temperaturas noturnas inferiores. Verifica-se também que às 16h as temperaturas são muito semelhantes, apresentando perfis quase verticais em todos os tabuleiros.

Com a análise deste dia, conclui-se que a vegetação é determinante nos ganhos solares da cobertura, contudo, sem influenciar de forma significativa o desempenho de cobertura verde.

4.3 Campanha de verão (estação de arrefecimento)

A campanha de monitorização da estação de arrefecimento, verão, iniciou-se a 4 de julho de 2016 e terminou a 26 de julho. Selecionou-se o período entre os dias 16 e 26 de julho como representativo da estação.

4.3.1 Resultados gerais da campanha

Na Figura 4.16 estão representados graficamente os resultados das temperaturas interiores de todos os tabuleiros ($T_{i,x}$), a temperatura exterior (T_e) e a radiação solar (RS) durante os dez dias da campanha desta estação. Nesta estação a temperatura interior do tabuleiro T6 não foi registada corretamente pelo termopar por isso foram utilizados os dados recolhidos pelo termohigrómetro que se encontrava no seu interior, o Tinytag, ficando com a designação $T_{i,6,T}$.

Os dados do vento recolhidos na estação meteorológica do IST (meteoTécnico), estão apresentados na Figura 4.17.

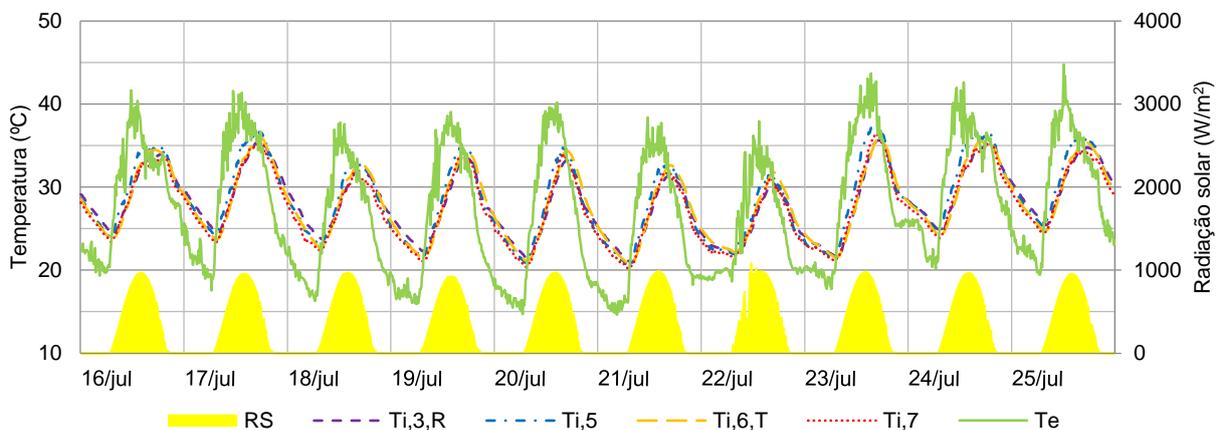


Figura 4.16 - Temperatura exterior e interior de todos os tabuleiros e radiação solar na campanha de verão

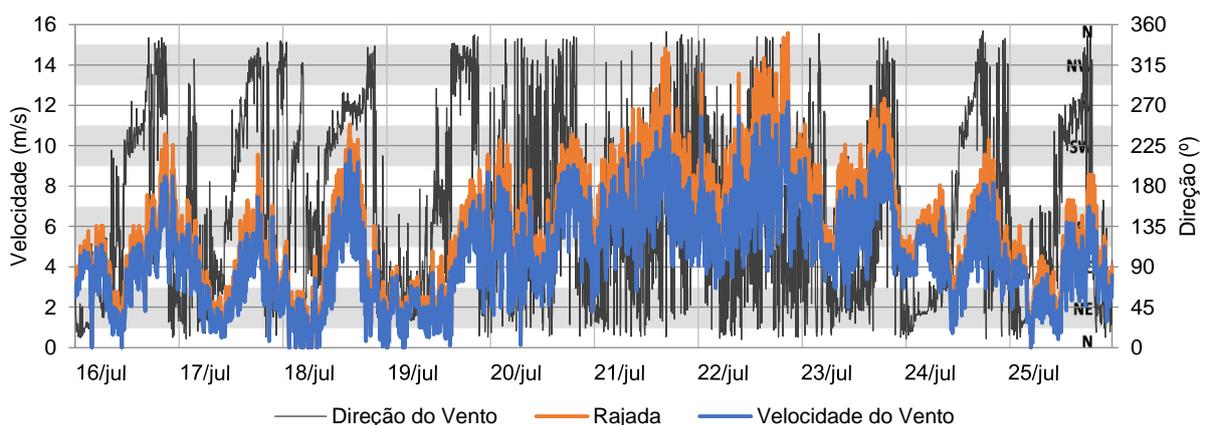


Figura 4.17 - Velocidade e direção do vento no IST durante a campanha de verão (meteoTécnico)

Na Figura 4.16 observa-se que, neste período, a radiação solar é semelhante todos os dias, devido às condições de céu limpo, existindo apenas um momento nublado no dia 22, o que é característico desta estação (Boletim Climatológico Julho 2016 IPMA, 2016). A radiação solar não sofre grandes alterações o que justifica o facto de as temperaturas não terem uma flutuação muito acentuada.

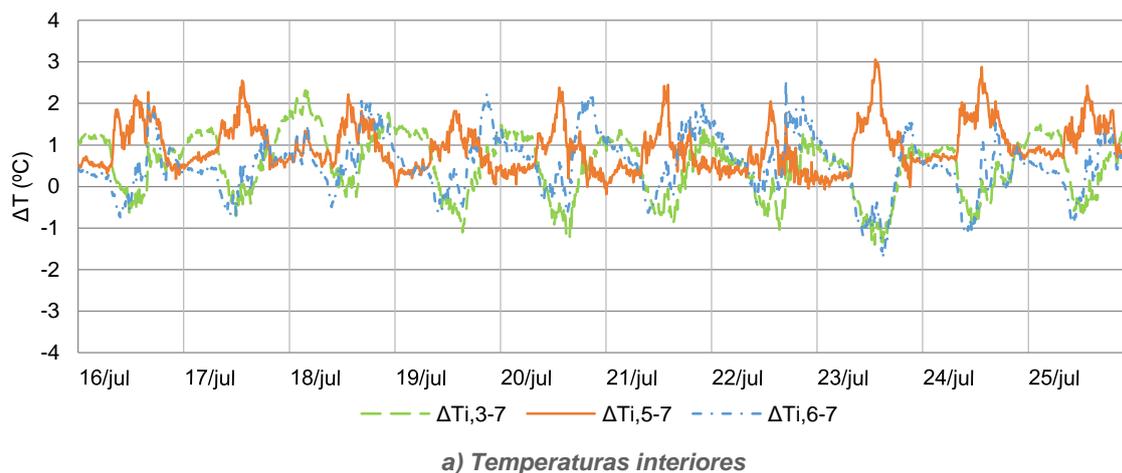
As temperaturas máximas diárias registaram-se entre os 35 e os 45°C, com valor máximo às 12h do dia 25 (44,75°C). As temperaturas mínimas também apresentam poucas variações, com um mínimo de 14,65°C às 4h20 do dia 21 de julho.

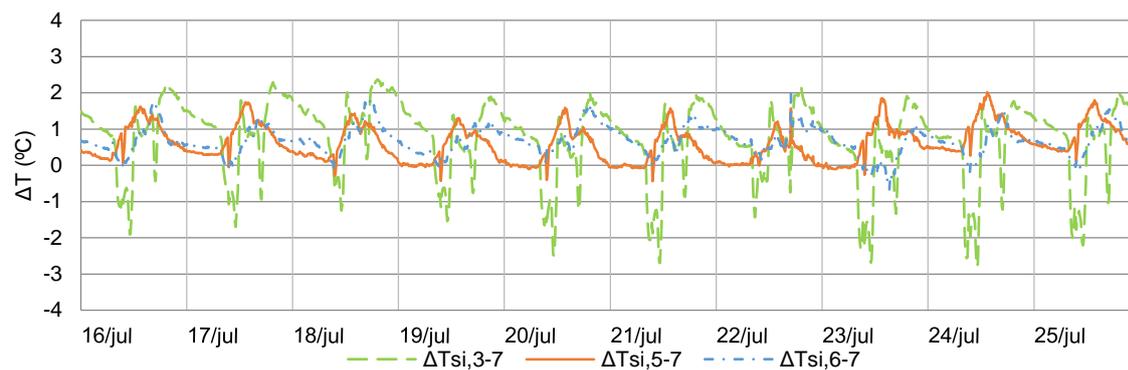
Na Figura 4.16 nota-se que as temperaturas interiores têm um comportamento mais estável. Destacam-se as temperaturas do ambiente interior do tabuleiro T5 ($T_{i,5}$), que um aquecimento mais rápido no início do dia e têm frequentemente os valores máximos diários de todos os tabuleiros, atingindo no dia 23 às 16h10 os 37,48°C. No entanto, o arrefecimento deste é também mais acelerado assim que a radiação solar diminuí. No período noturno, o tabuleiro T3 tem as suas temperaturas interiores ($T_{i,3,R}$) mais elevadas, ligeiramente superiores às do tabuleiro T6. Outro destaque faz-se à temperatura do tabuleiro T7 que constantemente apresenta as temperaturas mais baixas, exceto durante alguns picos máximos de calor.

Na Figura 4.17 observa-se maior intensidade do vento nos dias 21 e 22 de julho, e, cruzando estes dados com os das temperaturas, verifica-se uma relação da intensidade do vento com a temperatura exterior, e, conseqüentemente, com as temperaturas interiores gerais. Verifica-se que as temperaturas interiores do tabuleiro T7 são mais elevadas em relação aos restantes tabuleiros nestes dias de maior intensidade do vento. Isto deve-se à falta de estanqueidade e exposição ao vento deste tabuleiro, como verificado na campanha de inverno, mas, nesta estação do ano, o ar exterior é mais quente, aquecendo o interior.

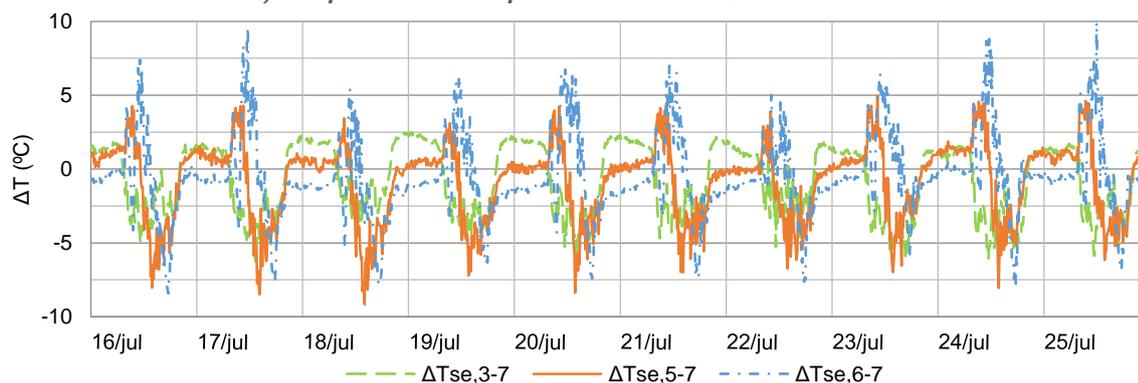
4.3.1.1 *Variações de temperatura em relação ao tabuleiro de referência*

Na Figura 4.18 apresenta-se as diferenças entre as temperaturas do tabuleiro de referência e os restantes tabuleiros: interiores em a), superfícies interiores na zona sem isolamento em b), superfícies exteriores na zona sem isolamento em c).





b) Temperaturas da superfície interior na zona sem isolamento



c) Temperaturas da superfície exterior na zona sem isolamento

Figura 4.18 - Variações de temperatura dos tabuleiros em relação ao tabuleiro de referência da campanha de verão

Na Figura 4.18 a), confirma-se que em geral as temperaturas interiores do tabuleiro T7 são mais baixas durante a noite do que as dos restantes tabuleiros. Durante as horas de maior calor as temperaturas interiores dos tabuleiros T3 e T6 são menores mas voltaram a ser mais altas com o anoitecer. Já o tabuleiro T5 apresenta-se frequentemente mais quente do que o tabuleiro T7, alcançando uma diferença de 3°C no dia 23 de julho.

As superfícies interiores, representadas na Figura 4.18 b), apresentam as suas temperaturas com um andamento semelhante ao das temperaturas do ambiente interior. Essas amplitudes eram menores nos tabuleiros T5 e T6 e maiores no tabuleiro T3. A temperatura da superfície interior do tabuleiro T3 apresenta alguns erros de leitura. Tentando omitir os erros, a análise leva às mesmas observações efetuadas na análise geral das temperaturas interiores, isto é, o tabuleiro T3 mantém-se com temperaturas mais quentes durante a noite e mais amenas durante o dia. Sem os erros de leitura, estima-se que as temperaturas superficiais interiores do tabuleiro T3 fossem sempre superiores às do tabuleiro T7. Isto indica que o substrato S2 é melhor isolante térmico.

A Figura 4.18 c) revela que as temperaturas das superfícies exteriores são alvo de maiores variações, quanto ao tabuleiro de referência, com o tabuleiro T6 a atingir uma diferença de 10°C no dia 25 de julho. O tabuleiro T6 fica mais frio durante a noite e é levado a extremos máximos e mínimos durante o dia, por esta ordem. O tabuleiro T5 tem temperaturas à superfície pouco superiores às do tabuleiro T7 durante a noite que sobem ao início do dia e descem para valores inferiores pouco depois, atingindo uma diferença máxima negativa de -9,15°C, no dia 18 de julho. Durante a noite o tabuleiro T3

obtem a temperatura à superfície mais elevada e durante o dia mantem-se sempre mais frio que o tabuleiro T7.

Cruzando os dados recolhidos durante toda a campanha de verão podem tirar-se, para cada tabuleiro, as seguintes conclusões:

- T3 - é o tabuleiro que mantem melhor a sua temperatura interior. Apesar de ser o que esteve mais quente durante a noite, este tabuleiro manteve a temperatura interior mais fria durante o dia. A vegetação densa de braquipódio impede a radiação solar de atingir o substrato e que este aqueça. O coeficiente de absorção deste tabuleiro é de 0,76 que é superior ao do tabuleiro T7, 0,71, no entanto, a sua superfície exterior regista menores temperaturas durante o dia. Estes coeficientes foram obtidos em Julho de 2015 e desde lá até a esta campanha as condições da vegetação podem ter sofrido alterações. Comparando as vegetação dos tabuleiros na Figura 3.10 o tabuleiro T3, a), parece ter a vegetação mais densa do que o tabuleiro T7, d), o que explica estas diferenças. Esta incoerência também pode dever-se à posição dos termopares, onde no tabuleiro T3 podia estar mais protegido e no T7 mais descoberto. Como as temperaturas interiores são superiores no período noturno e inferiores no período diurno toma-se a conclusão que o substrato S2, do tabuleiro T3, que é mais arenoso e tem menos matéria orgânica, não é tão bom condutor de temperatura como o substrato S1 do tabuleiro T7, que é mais argiloso;
- T5 - apesar da sua temperatura da superfície exterior ser bastante inferior à do tabuleiro de referência durante a segunda metade de cada dia, este é o tabuleiro que tem as suas temperaturas interiores mais elevadas. As quebras repentinas observadas na temperatura da superfície exterior insinuam que existe sombreamento da célula por parte da vegetação, pois a sonda foi instalada muito próximo de um pé de rosmaninho. Este sombreamento é benéfico, no entanto, não é suficiente em todo o tabuleiro para impedir a temperatura interior de subir. Este sombreamento não se faz notar na estação de inverno devido ao ângulo de incidência da radiação ser menor nessa estação. A presença de musgo não é benéfica nesta estação do ano, aumentando os ganhos solares e não permitindo que o calor se dissipe durante a noite;
- T6 - mantendo-se constantemente com temperaturas interiores superiores às do tabuleiro de referência observam-se grandes amplitudes no seu comportamento. Estas amplitudes sugerem um fraco desempenho desta solução de cobertura. O facto de o seu substrato estar desprotegido cria ganhos solares elevados, que não são vantajosos nesta estação do ano, mas também permite transferências de calor mais fáceis, que são benéficas apenas durante a noite. A utilização de alecrim proporciona algum sombreamento, que pode ser entendido pela análise das temperaturas superficiais exteriores, na Figura 4.18 c), mas é muito escassa para diminuir os ganhos solares eficazmente.

De forma geral entende-se que a utilização de braquipódio é a mais benéfica nesta estação, permitindo um sombreamento mais eficaz da superfície exterior. Revela-se que o efeito de sombreamento da vegetação tem uma influência significativa no desempenho das coberturas verdes.

A natureza do substrato também traz benefícios, sendo um substrato argiloso mais condutor do que um substrato arenoso, portanto, este último é pior opção para o desempenho das coberturas verdes nesta estação do ano.

4.3.1.2 Fluxos de calor

Os fluxos de calor medidos nesta campanha para os tabuleiro T5, a), e T7, b), estão representados graficamente na Figura 4.19, complementados pela radiação solar para melhor leitura dos dados. Nos gráficos, $Fl_{i,x}$ representa os fluxos de calor medidos na zona sem isolamento do tabuleiro Tx, linha verde contínua, e $Fl_{wi,x}$ representa os fluxos de calor da zona com isolamento, linha laranja a tracejado. Na campanha de verão foi adotado o mesmo sentido de fluxos da campanha de inverno, isto é, os fluxos ascendentes são positivos e os descendentes são negativos.

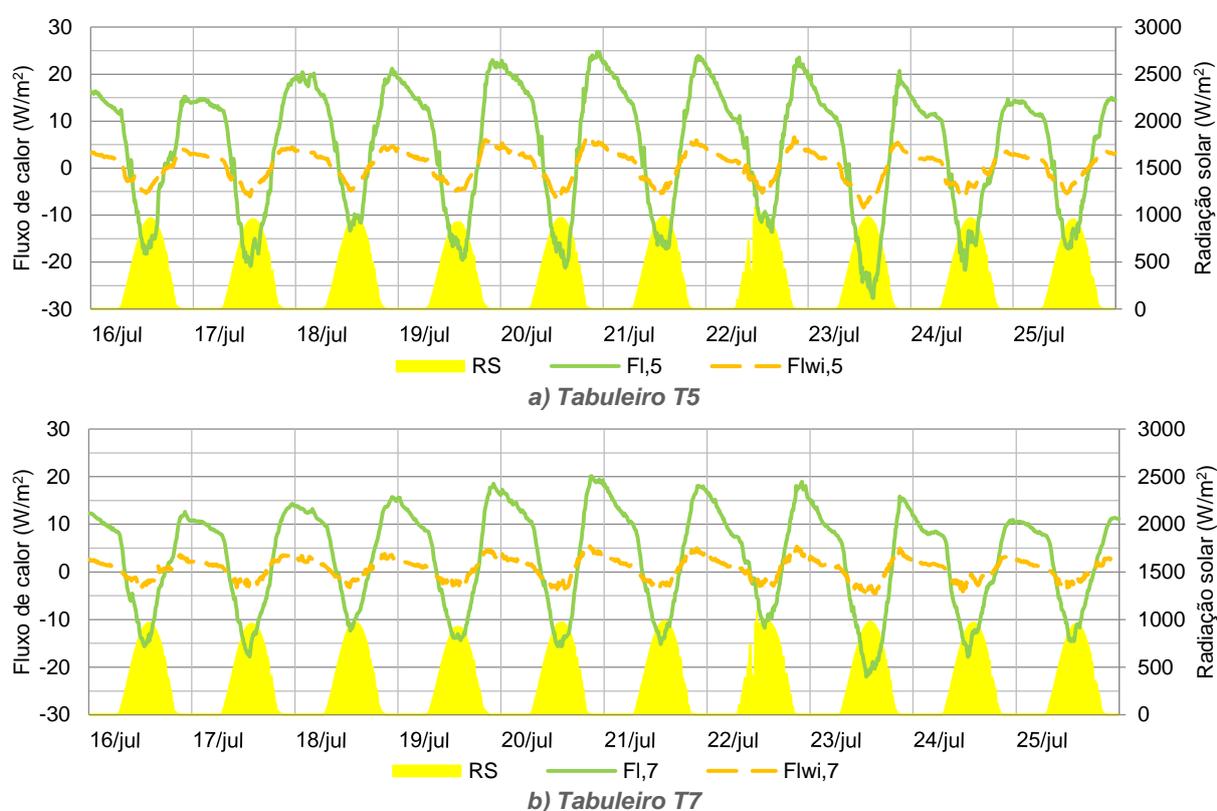


Figura 4.19 - Fluxos de calor no tabuleiro T5 e T7 nas zonas com e sem isolamento e radiação solar da campanha de verão

Mais uma vez, e como seria de esperar, os fluxos que atravessam as zonas sem isolamento são muito superiores aos da zona com isolamento, na ordem dos 300%. Chegando a atingir os 400% no dia 23 para o tabuleiro T7. Em ambos os tabuleiros os fluxos são ascendentes durante a noite e descendentes durante o dia. Os fluxos medidos no tabuleiro T5 são superiores aos do tabuleiro T7, como era esperável, em ambas as zonas. Existiu um pico de fluxo no dia 23 que atingiu os 27,68W/m² às 15h10 no tabuleiro T5 e 22,02W/m² às 13h00 no tabuleiro T7. Os mínimos foram a 20 de Julho com -24,68W/m² no tabuleiro T5 e -20,13W/m² no tabuleiro T7.

É perceptível a relação entre a radiação solar, e consequentemente a temperatura exterior, e os fluxos, quando a temperatura exterior sobe ou desce os fluxos comportam-se inversamente.

Comparando os tabuleiros, percebe-se que o tabuleiro T5 conduz melhor as temperaturas pois nele acontecem fluxos mais elevados. Como os tabuleiros tem o mesmo substrato, com a aproximadamente a mesma espessura, as diferenças resultam das vegetações diferentes e da rega. Este efeito tem origem no teor em água do substrato, pela rega faseada e retenção por parte do musgo, e por o braquipódio atuar como uma camada protetora e isolante mais eficaz que uma vegetação menos densa.

4.3.1.3 Humidade relativa do ar

Na Figura 4.20 estão os dados de temperaturas (T) e humidade relativa (H) para o interior do tabuleiro T7, gráfico a), e para o exterior, gráfico b).

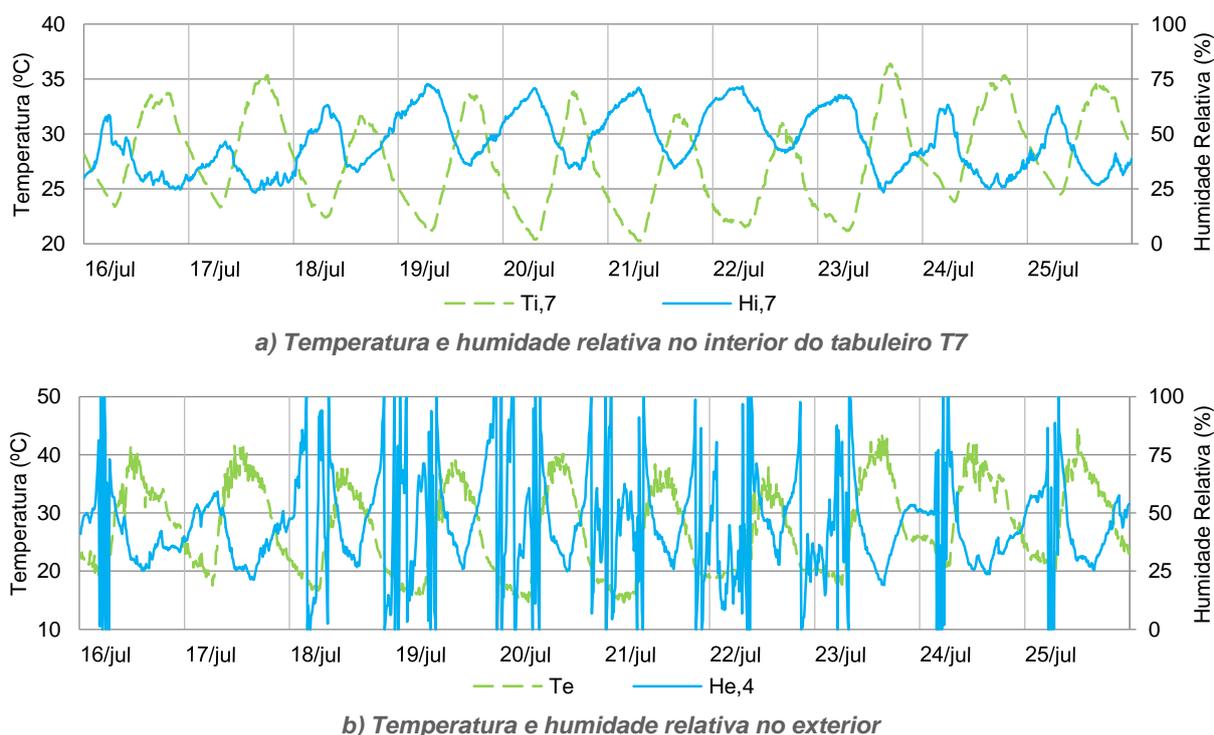


Figura 4.20 - Temperaturas e humidades relativas da campanha de verão

Pelo gráfico a) repara-se que a humidade relativa sofre variações cíclicas diárias, atingindo valores máximos de madrugada e mínimos ao final da tarde contrastando com o comportamento das temperaturas, que é inverso. Avaliando a tendência da humidade ela diminui em dias de maiores temperaturas e aumenta em dias de menores temperaturas, mantendo o seu comportamento inverso diário. Como não existe precipitação no período da campanha (Figura 4.21), os valores da humidade são relativamente baixos.

Na Figura 4.20 b) o comportamento da humidade relativa é muito inconstante, apresenta medições coerentes abaixo dos 60% mas, para valores mais altos, destabilizou, apresentando valores extremos.

A relação inversa entre a humidade e a temperatura exterior é evidente. No entanto, o seu efeito no desempenho térmico das coberturas verdes não tem tanta clareza. Os tabuleiros tinham rega automática diária e, por isso, o seu solo tinha condições de humidade reguladas, tornando a influência da humidade do ar pouco perceptível.

Observando os dados de precipitação no IST, na Figura 4.21, apura-se que não ter existe precipitação durante esta campanha, que, sendo característico da estação, levou à utilização de um sistema de rega automatizado.

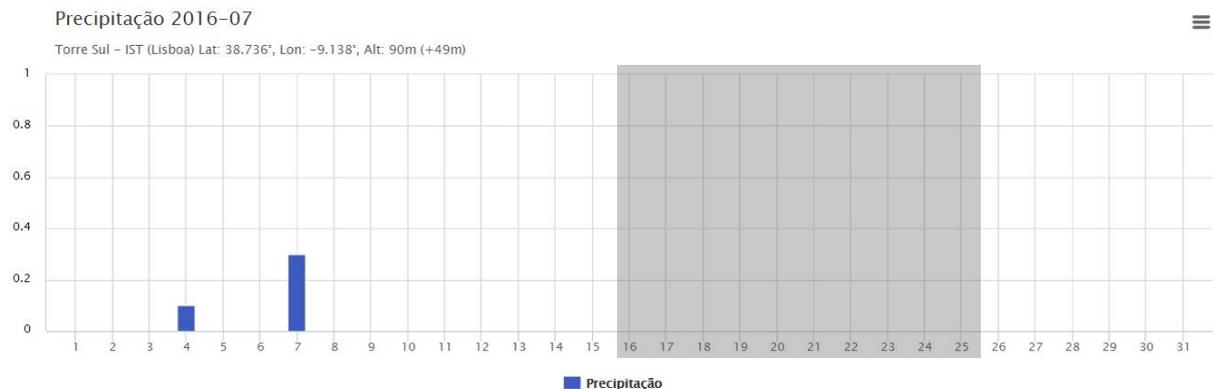


Figura 4.21 - Precipitação referente ao mês de Julho (meteoTécnico)

Para estudar o efeito da rega durante a estação de verão faz-se uma estimativa do coeficiente de transmissão térmica, U , com a mesma metodologia da campanha de inverno. Neste caso não existiu precipitação e como a rega ocorre às 8h, no início da radiação solar, que está também representada na Figura 4.22.

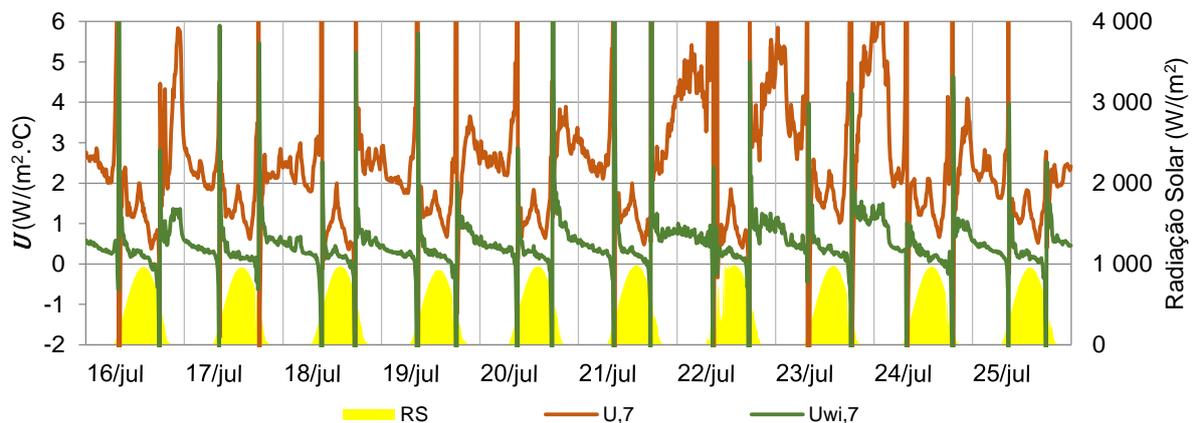


Figura 4.22 - Coeficiente de transmissão térmica e radiação solar na estação de verão

As assíptotas, quando as temperaturas exteriores e interiores são semelhante, coincidem com o período de rega, por isso é impossível estudar a influência da rega no desempenho térmico da cobertura nesta estação. Ainda assim, constata-se que, quando os fluxos são ascendentes, durante a noite, a transmissão térmica do sistema sem isolamento é superior comparativamente ao período diurno. O mesmo não se verificou na zona com isolamento. Este fenómeno deve-se à composição particulada do substrato. A presença de ar entre as partículas de solo dificulta a transferência descendente de calor pois, ao aquecer, o ar perde densidade e ascende. Com o ar quente a sair do substrato é mais difícil a condução de temperatura por parte do solo para o seu interior. Este fenómeno é vantajoso nesta estação do ano, dificultando o aquecimento durante o dia e facilitando a dissipação de calor durante a noite. Durante a noite os valores máximos coincidem com os períodos de maior intensidade do vento, nos dias 21, 22 e 23, indicando que a permeabilidade do substrato ao ar é também

benéfica para a dissipação do calor. Este facto também justifica o melhor desempenho do substrato S2 do tabuleiro T3, que por ser mais arenoso tem mais interstícios e é menos denso.

4.3.1.4 Identificação do dia tipo

Na campanha de verão a seleção do dia tipo recai apenas no conceito de temperatura Ar-Sol (T_{Ar-Sol}) uma vez que os ganhos solares são muito semelhantes todos os dias. Para tal, aplica-se o conceito aos valores médios de temperatura, durante todo o dia, e da radiação, quando esta existiu, como foi feito na campanha de inverno.

Na Tabela 4.4 apresentam-se os resultados do cálculo desta temperatura fictícia para os valores médios. As temperaturas (T) estão em °C e a radiação solar (RS) está em W/m².

Tabela 4.4 - Valores estatísticos diários e temperatura Ar-Sol diária da campanha de verão

Dia	Te Média	Te Máxima	RS Média	RS Máxima	T _{Ar-Sol}
16/jul	29,08	41,66	507,0	969	44,82
17/jul	29,17	41,57	506,0	957	44,88
18/jul	25,43	37,77	503,5	971	41,07
19/jul	25,96	39,05	477,5	925	40,79
20/jul	25,55	40,2	512,5	972	41,46
21/jul	24,70	38,37	517,4	986	40,77
22/jul	24,85	37,93	501,7	1085	40,42
23/jul	29,06	43,68	510,9	983	44,93
24/jul	30,75	42,59	513,5	969	46,69
25/jul	29,64	44,74	502,7	958	45,25

O dia 24 de Julho destaca-se por ter os valores da temperatura exterior média e da temperatura Ar-Sol mais. Já a radiação solar média foi máxima no dia 21 e a máxima foi no dia 22.

Selecionou-se então o dia 24 de Julho como dia tipo, designado como D+Q (dia mais quente) podendo também ser utilizado como representativo de um dia de verão com grande radiação solar incidente.

4.3.2 Dia mais quente (D+Q)

Na Tabela 4.5 estão os valores estatísticos de todas as grandezas medidas pelos sensores para este dia, onde estão apresentados valores médios, máximos e mínimos.

Tabela 4.5 - Valores máximos, médios e mínimos de temperaturas, fluxos e radiação no D+Q

			Valor			
			Médio	Máximo	Mínimo	
Temperatura (°C)	Exterior		Te	30,75	42,59	20,14
	T3	Sem isolamento	Tse,3	31,09	42,72	22,12
			Th1,3	30,50	36,93	22,95
			Th2,3	30,75	36,83	23,62
			Tsi,3	30,66	36,58	23,09
		Com isolamento	Tsewi,3	31,41	44,80	21,06
			Th1wi,3	30,44	36,09	22,17
			Th2wi,3	30,20	35,68	22,23
			Tsiwi,3	30,40	36,26	21,38
	Interior		Ti,3	30,08	35,50	24,50
	T5	Sem isolamento	Tse,5	32,27	44,47	21,82
			Th1,5	31,29	36,37	25,05
			Th2,5	31,10	35,46	25,81
			Tsi,5	31,04	35,78	26,00
		Com isolamento	Tsewi,5	31,66	50,32	21,56
			Th1wi,5	30,16	35,49	23,50
			Th2wi,5	30,35	35,65	23,83
			Tsiwi,5	30,61	36,44	24,26
	Interior		Ti,5	30,96	36,48	24,51
	T6	Sem isolamento	Tse,6	32,48	51,52	20,11
			Th1,6	30,93	36,20	25,34
			Th2,6	30,73	35,09	26,15
			Tsi,6	30,78	35,59	25,74
		Com isolamento	Tsewi,6	34,64	50,85	20,86
			Th1wi,6	30,93	36,99	24,23
			Th2wi,6	30,51	35,56	25,20
			Tsiwi,6	30,45	35,99	24,37
	Interior		Ti,6,T	29,98	35,54	24,08
T7	Sem isolamento	Tse,7	32,34	46,28	20,46	
		Th1,7	30,35	36,45	24,30	
		Th2,7	30,12	34,99	25,45	
		Tsi,7	30,14	34,87	25,53	
	Com isolamento	Tsewi,7	32,28	43,71	21,38	
		Th1wi,7	30,63	35,34	24,21	
		Th2wi,7	30,28	34,41	25,34	
		Tsiwi,7	29,57	34,96	23,68	
Interior		Ti,7	29,74	35,31	23,81	
Fluxo de calor (W/m ²)	T5	Sem isolamento	Fl,5	1,49	15,15	-21,70
		Com isolamento	Flwi,5	0,23	3,61	-6,26
	T7	Sem isolamento	Fl,7	0,41	11,84	-17,87
		Com isolamento	Flwi,7	0,34	3,13	-4,56
Radiação solar (W/m ²)			RS	320,95	969,00	-0,12

4.3.2.1 Mais Temperaturas interiores e da superfície exterior de todos os tabuleiros

A Figura 4.23 apresenta os valores registados no D+Q para as temperatura interiores de todos os tabuleiros ($T_{i,x}$), temperatura exterior (T_e) e radiação solar (RS) no gráfico a) e as temperaturas das superfícies exteriores de todos os tabuleiros ($T_{se,x}$) e a radiação solar no gráfico b).

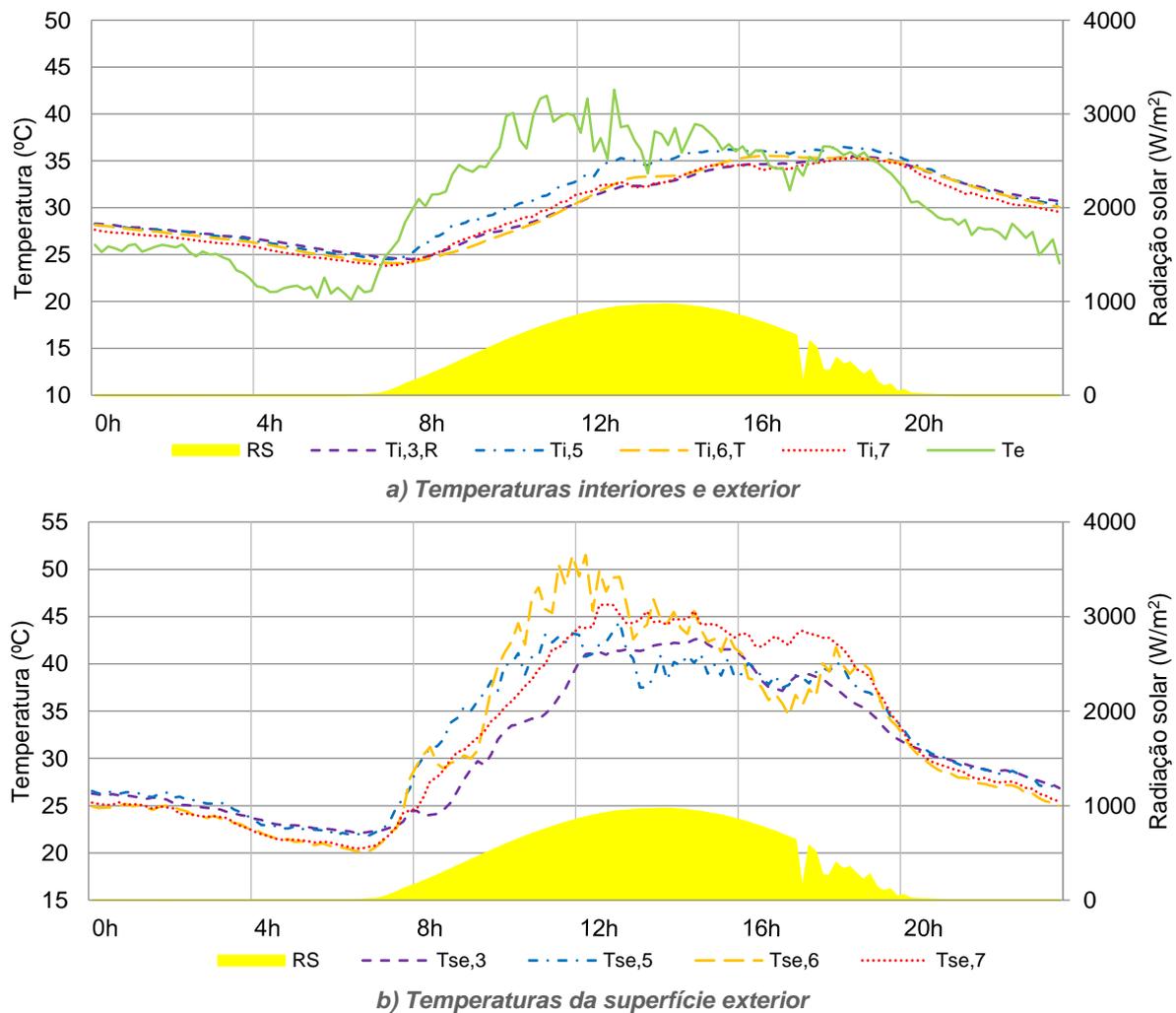


Figura 4.23 - Temperaturas de todos os tabuleiros e radiação solar no D+Q

Atendendo à Tabela 4.5 e à Figura 4.23, observa-se que no D+Q as temperaturas exteriores têm um máximo de 42,59°C às 12h50 e um mínimo de 20,14°C às 6h20 resultando numa média de 30,75°C. O aquecimento do ar exterior dá-se muito rapidamente assim que começa a existir radiação solar, existindo um intervalo de cerca de seis horas entre a temperatura mínima e a temperatura máxima, e a partir daí desce lentamente, com algumas oscilações, até ao pôr-do-sol onde começou a descer mais rapidamente.

As temperaturas interiores, na Figura 4.23 a), não têm um comportamento tão brusco como as temperaturas exteriores revelando-se mais estáveis. Estas aumentam quando a temperatura exterior é superior e diminuem quando é inferior. Observa-se que as temperaturas interiores do tabuleiro T5 são as mais elevadas, tendo um crescimento mais rápido que as restantes, e atinge o valor máximo de 36,48°C, que ocorreu após o máximo das temperaturas exteriores, às 18h30. Os restantes tabuleiros

têm valores de temperatura interior muito próximos, com o tabuleiro T6 a atingir a segunda temperatura máxima. Em geral, o tabuleiro T7 é o mais frio com as suas temperaturas, média, máxima e mínima, mais baixas de todos os tabuleiros.

O comportamento das temperaturas exteriores, Figura 4.23 b), difere um pouco em relação às temperaturas interiores. O tabuleiro T5 já não apresenta as temperaturas da superfície exterior mais altas, como aconteceu com as suas temperaturas do ambiente interior. Nesta superfície é o tabuleiro T6 que lidera, com as temperaturas mais altas, com 51,52°C de temperatura máxima, e tem um andamento muito semelhante às temperaturas exteriores, mas com maiores amplitudes, o que indica que alecrim não fornece uma proteção eficaz aos ganhos solares, nem auxilia a manutenção da temperatura. A quebra da Tse,6, entre as 8-9h pode ser consequência de um sombreamento, mas a rega que acontece nesse período também pode ter influência.

A Tse,7 mantém-se alta quando ocorre uma quebra repentina na temperatura exterior, confirmando que o braquipódio contribui para o desempenho térmico do tabuleiro. O tabuleiro T7, que tem temperaturas interiores inferiores aos outros tabuleiros nos outros dias, apresentou aqui temperaturas superiores às dos tabuleiros T5 e T3. Estas diferenças são causadas pelo sombreamento dos termopares por parte das plantas, que pode ter sido alterado devido à intensidade do vento dos dias anteriores, por ter folhas maleáveis.

O termopar da superfície exterior na zona sem isolamento do tabuleiro T5 deteta um aumento rápido da temperatura, até ser sombreado gradualmente pelo pé de rosmaninho, junto do qual foi instalado, conseguindo ser o que tem valores mais baixos nas horas de maior calor. O seu andamento e valores são muito semelhantes aos da temperatura exterior por estar sombreado, mas, com os resultados da temperatura interior, percebe-se que estes valores não são característicos do tabuleiro.

A Tse,3 é a que se manteve mais estável, conseguindo os valores médios e máximos mais reduzidos e os mínimos mais elevados. O andamento é semelhante ao do tabuleiro T7 por terem o mesmo tipo de vegetação. Este tabuleiro, por ter o solo arenoso e com menos matéria orgânica, S2, revela ter uma resistência mais elevada às transferências de calor. Esta estabilidade é também conseguida pela vegetação, que é a mais densa de todos os tabuleiros.

4.3.2.2 Fluxos de calor

Na Figura 4.24 estão apresentados os fluxos de calor dos tabuleiros T5 (verde) e T7 (azul) nas zonas com isolamento (escuro e tracejado) e sem isolamento (claro e contínuo). Os fluxos de calor continuam a ser apresentados com o mesmo sentido, o fluxo ascendente é positivo.

Em ambos os sentidos o tabuleiro T5 tem fluxos de calor superiores aos do tabuleiro T7, atingindo os -21,70 W/m² (descendente) e os 15,15 W/m² (ascendente). Isto comprova que a vegetação mais densa oferece isolamento térmico por dificultar a circulação do ar na superfície e diminuir também os ganhos solares.

O facto dos fluxos descendentes serem superiores aos ascendentes parece indicar que estes ocorrem mais facilmente contrariamente ao que foi determinado quando foi estudado o coeficiente de transmissão térmica, mas o gradiente de temperatura é muito superior durante o dia, Figura 4.23 a), conduzindo a fluxos de calor de valor mais elevado.

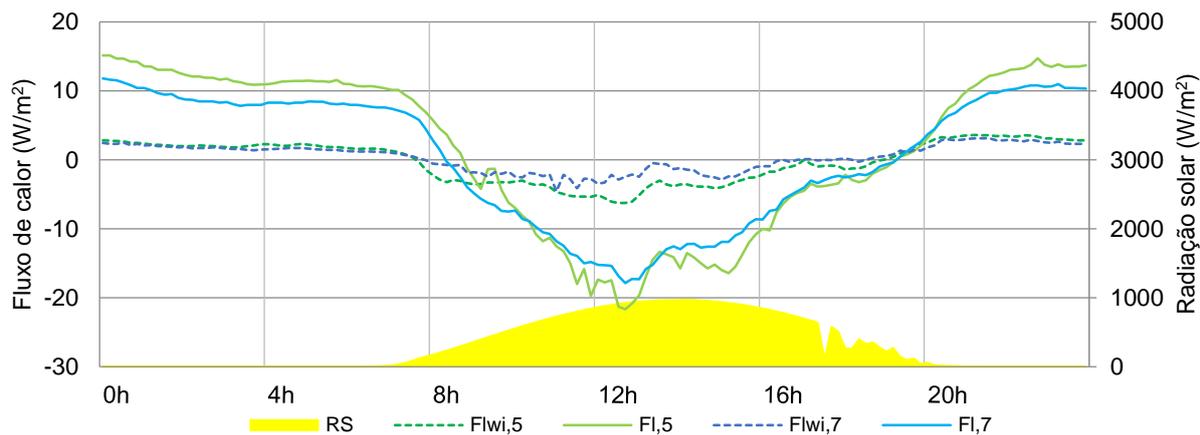


Figura 4.24 - Fluxos de calor dos tabuleiros T5 e T7 e radiação solar no D+Q

4.3.2.3 Temperaturas do substrato

Para o tabuleiro T7 foi analisado o comportamento do substrato comparando as temperaturas às várias profundidades. Na Figura 4.25 estão apresentados os resultados para a zona não isolada, a), e para a zona com isolamento (wi), b). A legenda está ordenada de acordo com a profundidade, indo da temperatura da superfície exterior (Tse) até à temperatura do ambiente interior (Ti).

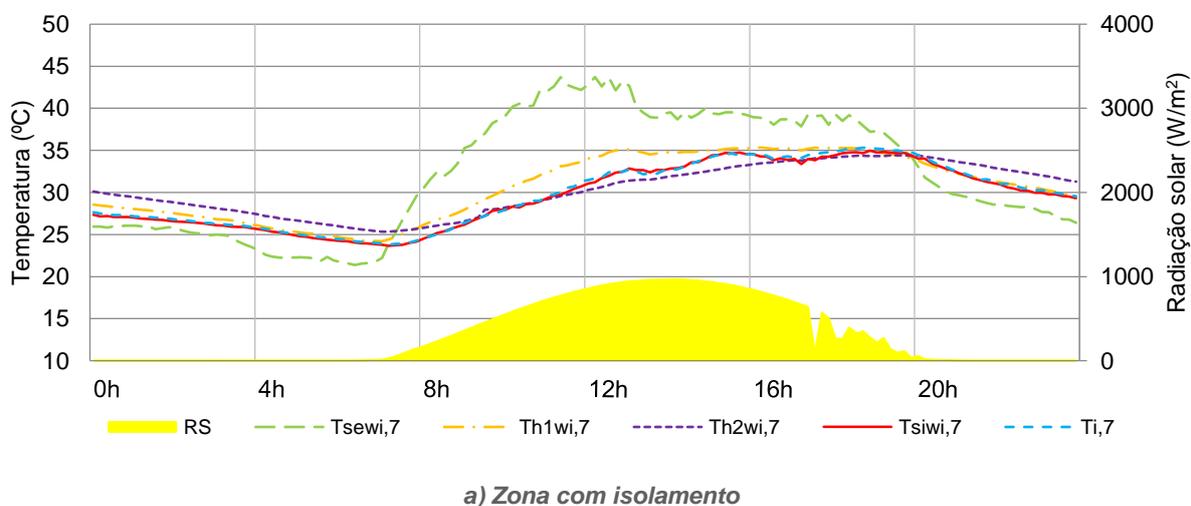
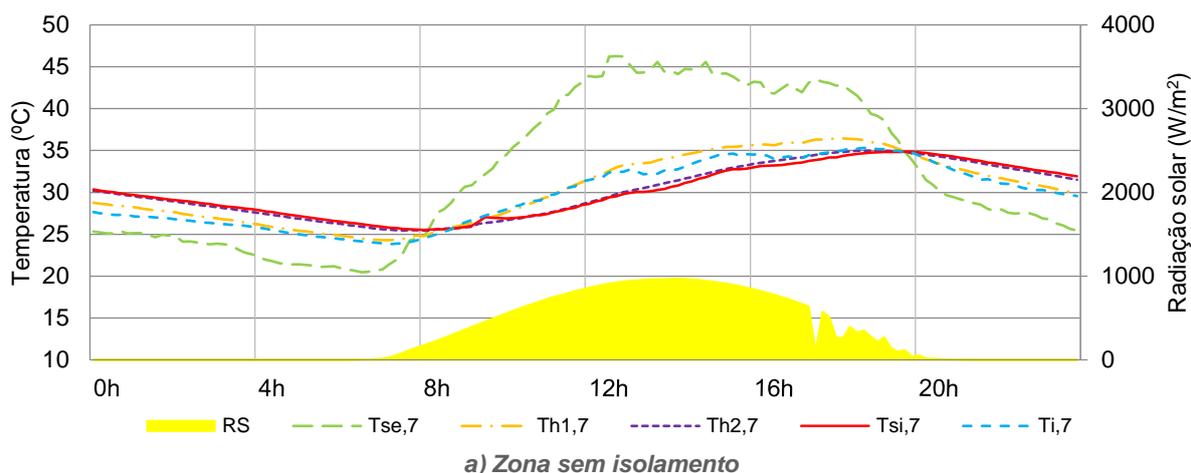
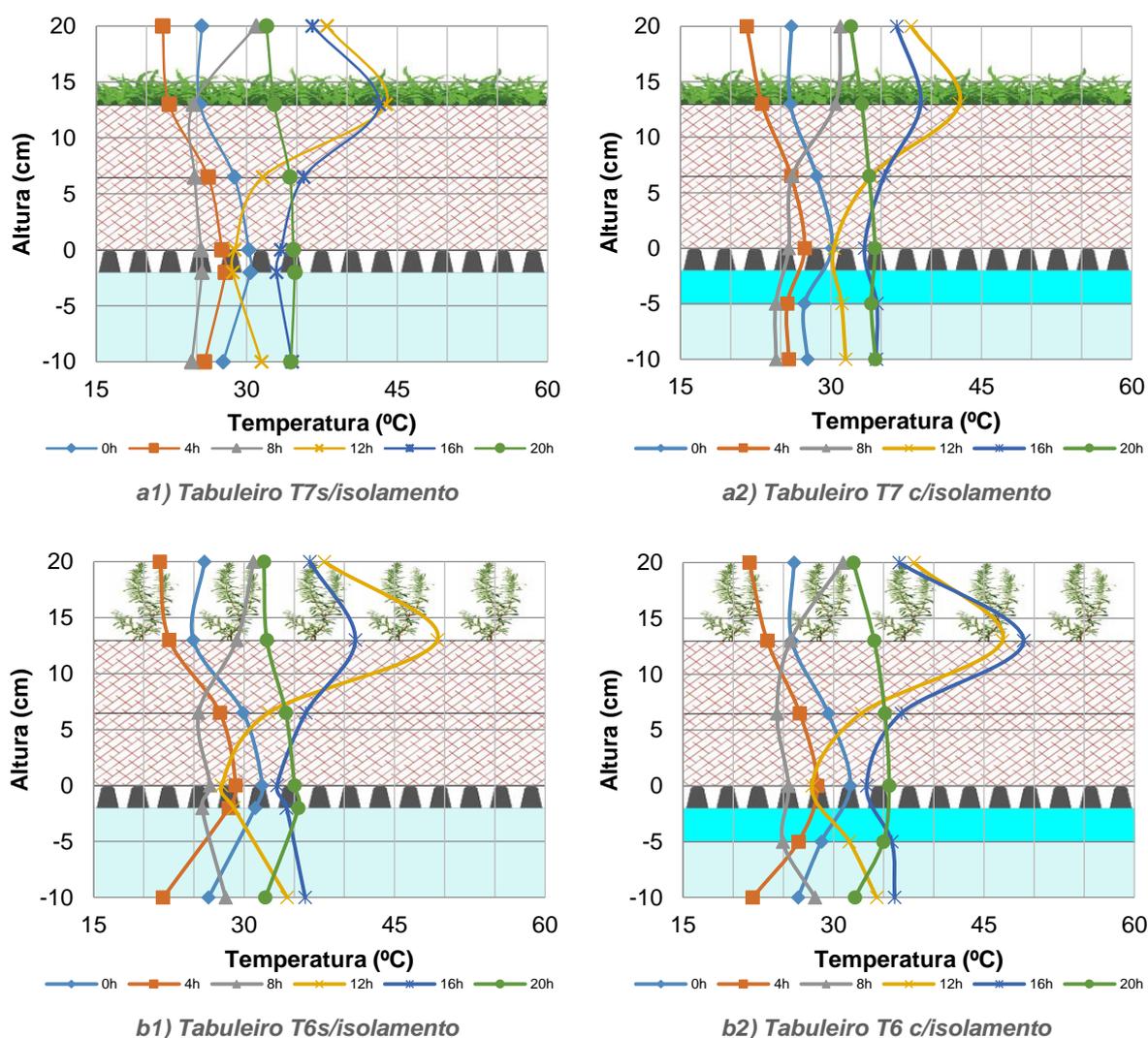


Figura 4.25 - Temperatura do substrato do tabuleiro T7 e radiação solar no D+Q

Comparando ambos os gráficos da Figura 4.25, e com auxílio da Tabela 4.5, observa-se que a temperatura da superfície exterior (T_{se}) é superior na zona com isolamento ao início do dia e na zona sem isolamento ao final do dia. Esta diferença acontece por influência do sombreamento da vegetação. Na zona com isolamento, a temperatura do terreno a meia profundidade (T_{h1}) aumenta mais rapidamente mas não alcançou o valor máximo, que se observa na zona sem isolamento. Na zona com isolamento, as restantes temperaturas têm um andamento muito semelhante ao da temperatura interior. Na zona sem isolamento, as temperaturas do substrato revelam-se mais baixas do que as do ambiente interior quando o tabuleiro está em aquecimento. Isto revela que o aquecimento do tabuleiro não acontece apenas pela cobertura. O inverso acontece com o arrefecimento do compartimento, já que a temperatura das zonas mais profundas do substrato se encontram a maiores temperaturas logo, a maioria das trocas de calor não acontece pela cobertura.

4.3.2.4 Perfis dos tabuleiros

Na Figura 4.26 compararam-se os gradientes de temperatura entre todos os tabuleiros por ordem decrescente, T7-T3, a) a d), para as zonas sem e com isolamento, x1) e x2) respetivamente.



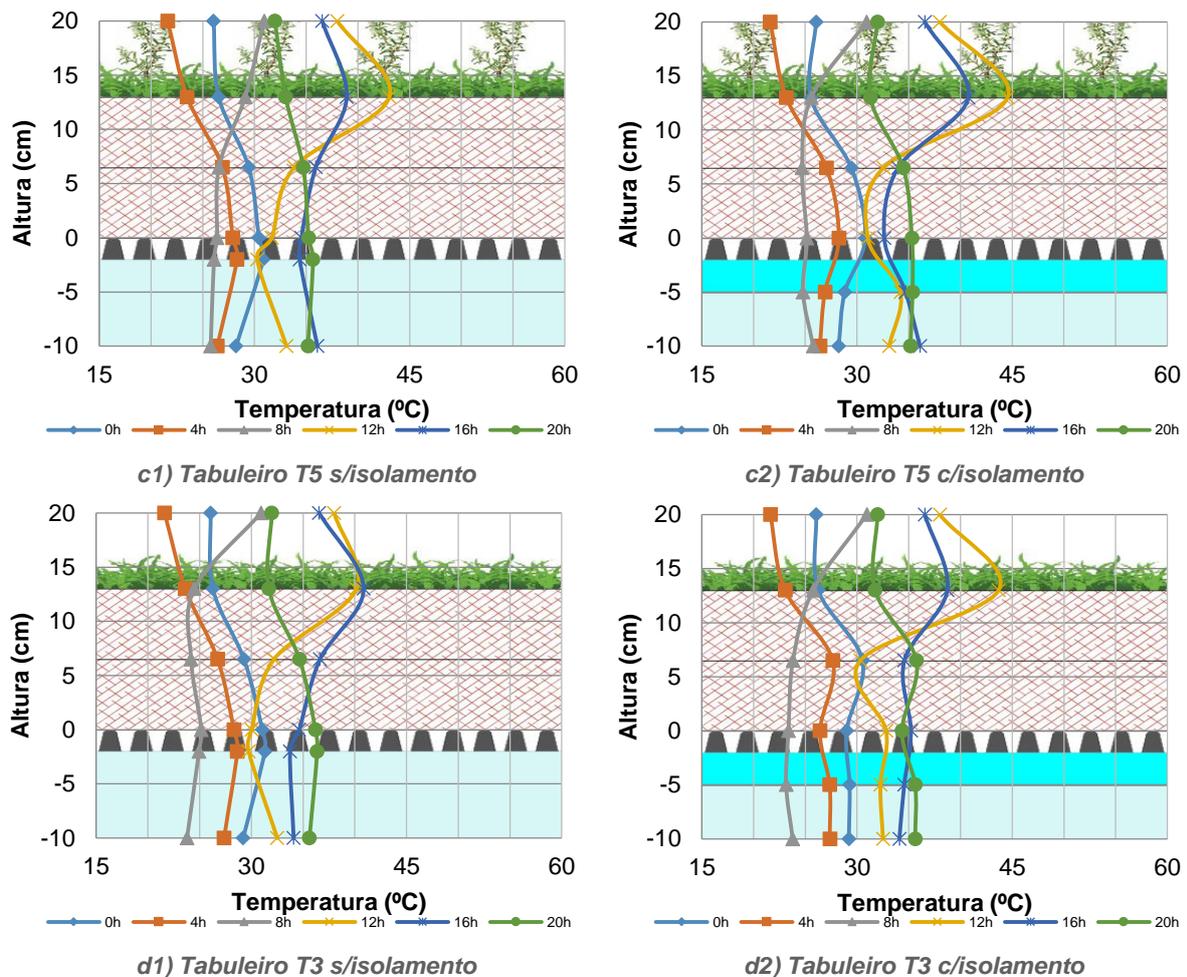


Figura 4.26 - Gradiente de temperatura em profundidade dos tabuleiros no D+Q

De forma geral observa-se que, nas horas de aquecimento, 12h e 16h, as temperaturas do substrato a maior profundidade e da superfície interior são as que apresentam valores mínimos, o inverso ocorre nas horas de arrefecimento, 0h e 4h. As 8h e 20h são horas de transição entre períodos de aquecimento e arrefecimento, apresentando declives pouco acentuados. Isto conduz às mesmas conclusões retiradas da análise das temperaturas do substrato em profundidade do tabuleiro T7.

Com estes perfis verifica-se que existe maior amplitude térmica nas superfícies exteriores e menores na maior profundidade do substrato, sendo ligeiramente superior nas superfícies interiores e a meia profundidade.

O caso mais curioso destes perfis é o do tabuleiro T3 na zona com isolamento, d2). Aí nas horas de aquecimento as Th2 são um máximo local quando deveriam ser um mínimo em ambas as horas mas com menos relevância às 16h. O inverso também acontece para as horas de arrefecimento mas menos acentuadas. Isto pode ser explicado com uma permanência de água nessa zona, que é um bom condutor.

Conclui-se que a vegetação tem influência nos ganhos solares por parte da cobertura. Nesta estação os ganhos solares já demonstraram ter mais influência na temperatura interior, com fluxo descendentes elevados. A vegetação mais densa, braquipódio nos tabuleiros T3 e T7, voltou a devolver melhores resultados.

5 Conclusões e desenvolvimentos futuros

O presente trabalho incide sobre o comportamento térmico de coberturas verdes semi-intensivas. O estudo do comportamento térmico de coberturas verdes realizou-se em modelos reduzidos de coberturas verdes, com diferentes tipos de vegetação e substrato, utilizando quatro tabuleiros do projeto NativeScapeGR (FCT, 2015), tendo-se criado compartimentos inferiores à custa de aplicação, na envolvente vertical e horizontal, de placas de isolamento térmico de poliestireno extrudido. Após uma revisão do estado da arte sobre coberturas verdes (capítulo 2) foi caracterizada (no capítulo 3) a estrutura dos tabuleiros, as camadas utilizadas, os tipos de substrato e os diversos tipos de vegetação presentes nos tabuleiros. Foi determinada uma metodologia para a execução das campanhas mencionando os equipamentos empregues.

Após a recolha de dados, que seguiu a metodologia definida no capítulo 3, foram analisados e discutidos os resultados no capítulo 4. Foram comparadas as variáveis medidas para os diferentes modelos de cobertura (com diferentes substratos e vegetação) separadamente para cada campanha de inverno e verão.

De seguida apresentam-se as principais conclusões desta dissertação e serão propostos alguns desenvolvimentos futuros.

5.1 Conclusões

Os resultados das campanhas experimentais em modelos reduzidos de cobertura verde, permitiram satisfazer os objetivos de analisar a influência do tipo de substrato e da vegetação no desempenho térmico das coberturas verdes em clima mediterrâneo.

Relativamente ao tipo de substrato, os resultados da campanha de verão indicam que o substrato S2 tem melhor desempenho térmico do que o substrato S1. Durante todo dia o tabuleiro T3, o único que continha este substrato, foi o que manteve melhor a temperatura interior, isto é, a diferença entre as suas temperaturas máximas e mínimas foi inferior às dos outros tabuleiros e as suas variações de temperatura foram mais lentas. Este substrato tem um teor em argila inferior e um teor de matéria orgânica muito inferior ao do substrato S1. O substrato S1 tem 9,4% de argila e 73% de matéria orgânica enquanto o substrato S2 tem 3,5% e 7% de argila e matéria orgânica, respetivamente. Conclui-se então que um maior teor de matéria orgânica leva a um aumento da condutibilidade térmica do substrato concordando com as afirmações de Sailor et al. (2008).

No geral, na estação de inverno a vegetação que coloniza as coberturas verdes não tem um papel determinante no desempenho das mesmas, existindo ligeiras vantagens na utilização de vegetação mais densa. Com vegetação mais densa, como é o exemplo da espécie braquipódio utilizado nos tabuleiros T3, T5 e T7, refletindo-se especialmente nas temperaturas superficiais exteriores, não tendo grande influência na temperatura do ambiente interior. Este fenómeno também foi verificado por Feng et al. (2010), que observou que os ganhos de calor eram dissipados principalmente por evapotranspiração e por radiação. Embora a vegetação mais densa minimize os ganhos solares, esta oferece maior proteção quanto aos agentes climáticos, nomeadamente o vento, que provoca o arrefecimento das superfícies desprotegidas. O fluxo de calor pela cobertura é também afetado pela

presença de água no substrato, especialmente na estação de inverno em que a precipitação é frequente. Tal como descrito em Lanham (2007), Squier & Davidson (2016) e Yang et al. (2015) a utilização de isolamento térmico sob o substrato é mais eficaz na redução das perdas de calor pela cobertura do que o tipo de cobertura verde. A influência do substrato e da vegetação foram limitados quando era utilizado isolamento térmico.

Já no verão, a vegetação revela ter maior importância. Os ganhos solares nesta estação são muito maiores do que no inverno, mesmo em dias de maior incidência de radiação solar. Os fluxos de calor durante o dia são descendentes e atingem valores elevados, por isso as vegetações mais densas conseguem demonstrar um maior benefício na estação de verão pois reduzem os ganhos solares consideravelmente. Este facto foi verificado por diversos autores (Liu, 2004; Squier & Davidson, 2016; Sailor et al., 2011; Wong et al., 2003; Schweitzer & Erell, 2014; Silva et al., 2016)

Verificou-se também que nos períodos de maior precipitação ocorria um aumento do fluxo de calor pela cobertura, que foi ainda mais notório na estimativa dos coeficientes de transmissão térmica, U , do tabuleiro T7 que tomou valores mais elevados nesses mesmos dias de maior precipitação. Pôde-se então concluir que a presença de água no substrato aumenta as trocas de calor por este meio. Lazzarin et al. (2005) também observou este facto e para além disso, que no verão e nos períodos de maior calor, o fluxos de calor, que deveriam ser descendentes, anulavam-se e até se invertiam quando o solo estava saturado, pois facilitava o processo de evapotranspiração. Como isto não se verificou neste caso, pelo facto de não ter ocorrido precipitação na campanha de verão e a rega ter sido otimizada para valores o mais baixo possíveis, deduz-se que o solo estava demasiado seco para beneficiar o desempenho das coberturas verdes. Do ponto de vista térmico seria benéfico a rega ocorrer várias vezes ao dia para auxiliar a dissipação do calor, mas esse não era o objetivo do projeto NativeScapeGR, que controlava a rega.

Com a análise dos dias tipo foi possível verificar estas conclusões com mais detalhe. Esta análise demonstrou que as várias camadas das coberturas verdes tinham maior inércia térmica do que as coberturas tradicionais, com flutuações térmicas mais reduzidas. Isto é uma vantagem quanto à durabilidade das telas de impermeabilização, que se degradam com os ciclos térmicos e com as altas temperaturas, pois as camadas que as protegem reduzem ou evitam que ela sofra com estas ações. Os estudos de Wong et al. (2003), Dvorak & Volder (2013), Lazzarin et al.(2005) e Bevilacqua et al. (2015) também observaram um fenómeno semelhante.

5.2 Limitações e desenvolvimentos futuros

Como principais limitações do presente trabalho pode apontar-se o facto destas campanhas experimentais terem sido realizadas em ambiente exterior com condições pouco controladas. Em particular, o deficiente nível de estanqueidade ao ar dos compartimentos instalados pode ter influenciado alguns resultados bem como a possibilidade da intervenção animal nos resultados, pois no ISA existe uma comunidade de pavões que por vezes passava sobre os tabuleiros.

Outra limitação refere-se ao funcionamento do sistema de climatização durante o inverno, pelo facto das lâmpadas incandescentes serem sujeitas a muitos ciclos (ligar/desligar) e deixavam de funcionar, e por os compartimentos estarem trancados era difícil verificar o seu funcionamento.

Sugere-se como desenvolvimento futuro, estudos com outros tipos de substrato e de vegetação para estudar o seu efeito nas coberturas verdes em clima mediterrâneo, quer no inverno quer no verão.

A utilização de um sistema de aquecimento independente em cada tabuleiro também seria uma boa opção para permitir avaliar os consumos e necessidade de climatização de cada solução de cobertura.

Relativamente à rega, seria pertinente utilizar um sistema controlado que permitisse avaliar a influência da água do solo e controlar o nível de hidratação das plantas. Assim conseguir-se-ia avaliar o efeito da evapotranspiração neste tipo de cobertura.

Estudos futuros beneficiariam da construção de células de teste com condições bem controladas. Desta forma, conseguir-se-ia quantificar objetivamente os benefícios de cada parâmetro das coberturas verdes.

Referências

- ANCV. (2015). *Projetos Zinco | Landlab*. Obtido em 2017, de <http://ancv.webnode.pt/projetos/zinco-landlab/>
- Bevilacqua, P., Coma, J., & Pérez, G. (2015). Plant cover and floristic composition effect on thermal behaviour of extensive green roofs. *Building and Environment*.
- Boletins Climatológicos IPMA*. (Fevereiro de 2016). Obtido em 21 de Setembro de 2016, de IPMA: http://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20160307/gQphjWbDhharzKWRtUvm/cli_20160201_20160229_pcl_mm_co_pt.pdf
- Boletins Climatológicos IPMA*. (Julho de 2016). Obtido em 21 de Setembro de 2016, de IPMA: http://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20160804/ZtQLGjZAOdMxcajQukNP/cli_20160701_20160731_pcl_mm_co_pt.pdf
- Carapeto, A., Clamote, F., Portela-Pereira, E., Cardoso, P., Gomes, C. T., Canha, P., . . . Araújo, P. V. (2016). *Lavandula stoechas L. subsp. stoechas - mapa de distribuição*. Retrieved Outubro 3, 2016, from Flora-On: Flora de Portugal Interactiva, Sociedade Portuguesa de Botânica: <http://www.flora-on.pt/#wLavandula+stoechas+subsp.+stoechas>
- 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.
- EFB. (2015). *About us...* Retrieved Julho 26, 2015, from European Federation of Green Roof Associations: <http://www.efb-greenroof.eu/verband/wir/aboutus.html>
- FCT. (2015). *The project*. Retrieved Outubro 1, 2016, from NativeScapeGR: <http://www.isa.utl.pt/proj/NativeScapeGR/>
- 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.
- Henry, A., & Frascaria-Lacoste, N. (2012). The green roof dilemma—Discussion of Francis and Lorimer (2011). *Journal of environmental management*, 104, 91-92.
- IGRA. (2012). *Green Roof Policies*. Obtido de Internationa Green Roof Association : http://www.igra-world.com/images/news_and_events/IGRA-Green-Roof-Policies.pdf
- IGRA. (2012). *Green Roof Types*. Obtido em 2017, de IGRA: http://www.igra-world.com/types_of_green_roofs/index.php
- ISA. (2016). *Localização*. Obtido em 1 de Outubro de 2016, de ISA: <https://www.isa.ulisboa.pt/apresentacao/localizacao>
- Jones, W. P. (2001). *Air Conditioning*. Butterworth Heinemann.
- Landlab. (2017). *Sistemas de Construção com Vegetação*. Lisboa.
- 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.
- Meneses, G. (2015). *Avaliação Experimental do Comportamento Térmico de Coberturas Verdes Semi-Intensivas na Estação de Arrefecimento*. Instituto Superior Técnico.
- meteoTécnico. (s.d.). Obtido em 21 de Setembro de 2016, de ULisboa: <http://meteo.tecnico.ulisboa.pt>
- 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?* Massachusetts, EUA: ProQuest, UMI Dissertation Publishing.
- 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.
- 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., . . . Liu, K. (2007). Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *BioScience*, 57(10), pp. 823-833.
- Porto, M., Carapeto, A., Clamote, F., Araújo, P., Pereira, A., Almeida, J., . . . al., e. (2016). *Rosmarinus officinalis L. - mapa de distribuição*. Retrieved Outubro 3, 2016, 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. J., Ribeiro, S., . . . al., e. (2016). *Brachypodium phoenicoides (L.) Roem. & Schult. - mapa de distribuição*. Retrieved Outubro 3, 2016, 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.
- Robinson, A. (2013, Setembro 19). Finding Babylon's Gardens. *Current World Archaeology*, pp. 58-59.
- Sailor, D. J., Elley, T. B., & Gibson, M. (2011). Exploring the building energy impacts of green roof design decisions—a modeling study of buildings in four distinct climates. *Journal of Building Physics*.
- 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.
- 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.
- 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, C. M., Gomes, M. G., & Silva, M. (2016). Green roofs energy performance in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 318-325.
- 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
- 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.
- Squier, M., & Davidson, C. I. (2016). Heat flux and seasonal thermal performance of an extensive green. *Building and Environment*, 238-244.
- 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.
- Vijayaraghavan, K. (2015). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits,. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 740-752.
- Wark, C., & Wark, W. (2003). Green Roof Specifications and Standards – Establishing an emerging technology. *The Construction Specifier*, Vol.56, Nº8.
- Wong, J. K., & Lau, L. S.-K. (2013). From the "urban heat island" to the "green island"? A preliminary investigation into the potential of retrofitting green roofs in Mongkok district of Hong Kong. *Habitat International*, 25-35.
- 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.