



Katya de Sousa Dias Coelho

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA MODULAR DE COBERTURA VERDE: COMPORTAMENTO TÉRMICO, HÍDRICO E ACÚSTICO

EVALUATION OF A MODULAR GREEN ROOF SYSTEM: THERMAL, HYDROLOGICAL AND ACOUSTIC BEHAVIOUR

Dissertação de Mestrado em Energia para a Sustentabilidade, na área de Especialização em Edifícios e Ambiente Urbano orientada pelo Professor Doutor Nuno Simões e pela Professora Doutora Julieta António.

Coimbra, 4 de Março de 2019



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Projeto de dissertação

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA MODULAR DE COBERTURA VERDE: COMPORTAMENTO TÉRMICO, HÍDRICO E ACÚSTICO

Evaluation of a modular green roof system: Thermal, hydrological and acoustic behaviour

Katya de Sousa Dias Coelho

Dissertação de Mestrado em Energia para a Sustentabilidade, na área de Especialização em Edifícios e Ambiente Urbano orientada pelo Prof. Doutor Nuno Simões e pela Prof. Doutora Julieta António.

Com a colaboração:



Coimbra, 4 de Março de 2019

Agradecimentos

O presente trabalho teve o apoio do Portugal 2020 através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) através do projeto GreenSolarShade (ref. POCI-01-0247-FEDER-017844).

Aos meus orientadores, Prof. Doutor Nuno Simões e Prof. Doutora Julieta António, pelo permanente apoio e pelos conhecimentos transmitidos que enriqueceram não só o trabalho como também a minha experiência profissional.

Ao Itecons por disponibilizar as suas instalações e a todos os técnicos envolvidos neste projeto pelo apoio e acompanhamento prestado durante as campanhas experimentais.

Aos meus colegas e amigos pelo apoio e amizade que demonstraram e pelo estímulo nesta fase final. E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização e conclusão deste trabalho.

Um agradecimento especial à minha família, à minha mãe e à minha avó, pelo apoio incondicional, paciência e ensinamentos partilhados, sem vocês não seria possível.

Resumo

O crescimento económico e o aumento da população mundial, e conseqüente aumento da urbanização, tem conduzido a vários problemas nas cidades como as cheias, o efeito da ilha de calor, poluição sonora, diminuição da qualidade da água e do ar, entre outros. A procura e implementação de soluções mais sustentáveis, para atenuar muitos dos efeitos negativos resultantes do crescimento urbano, tem aumentado ao longo dos últimos anos.

As coberturas verdes são atualmente apontadas como uma solução que pode beneficiar o ambiente, contribuindo para o aumento das áreas verdes nas cidades melhorando a qualidade do ar, aumentando a biodiversidade, contribuindo para a gestão das águas pluviais, mitigando o efeito da ilha de calor urbano e reduzindo a poluição sonora nas áreas urbanas, etc. As vantagens das coberturas verdes têm potenciado o aparecimento de novas soluções no mercado, nomeadamente de soluções modulares, as quais constituem uma alternativa à solução convencional de cobertura verde. Os sistemas modulares de cobertura verde oferecem maior flexibilidade em relação ao sistema convencional, visto que simplificam a preparação e instalação em obra, facilitam a manutenção e eventual substituição, podendo ser utilizadas em situações de reabilitação e instalação em coberturas inclinadas. No entanto, apesar de já existirem vários sistemas no mercado, estas soluções carecem de caracterização.

Nesse sentido, no âmbito do presente trabalho, pretende-se avaliar o comportamento térmico, hídrico e acústico de um sistema modular de cobertura verde. Para esse efeito, foi realizada uma campanha experimental em que se quantificaram as temperaturas superficiais e os fluxos de calor, a capacidade de drenagem e retenção de água e ainda a absorção sonora. Estes parâmetros serão úteis, no futuro, para avaliar o benefício destes sistemas à escala urbana.

Palavras-chave: Coberturas verdes; sistemas modulares; comportamento térmico; drenagem e retenção de água; absorção sonora.

Abstract

Economic growth, rapid urban expansions, and numerous infrastructure developments have led to several problems in cities such as: floods, urban heat island effect, noise pollution, and the reduction of water and air quality, among others. The search for, and implementation of, more sustainable solutions to mitigate many of the negative effects of urban growth has increased over the last few years.

Green roofs are currently targeted as a solution that can benefit the environment by increasing the number of green areas in cities, improving air quality, increasing biodiversity, contributing to rainwater management, mitigating the urban heat island effect and reducing noise pollution, etc. The advantages of green roofs have incentivized the appearance of new solutions in the market, namely modular solutions, which are an alternative to conventional green roofs. Modular green roof systems offer greater flexibility compared to the conventional system because they provide the least time intensive installation, allow for maintenance without completely dismantling the system, can be used for rehabilitation, and installed in steep roofs. Although there are already several systems on the market, these solutions need to be characterized.

In the scope of the present work, it is intended to evaluate the thermal, hydrological and acoustic behaviour of a modular green roof system. For this purpose, an experimental study was conducted in which surface temperatures and heat fluxes, water drainage and retention capacity, and sound absorption were quantified. These parameters will be useful in the future to assess the benefit of these systems at the urban scale.

Keywords: Green roofs; modular systems, sound absorption; drainage and water retention; thermal behaviour.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice	vii
Lista de figuras	ix
Lista de tabelas	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e motivação	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura da dissertação.....	3
2. Estado da arte	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. Constituição das coberturas verdes	10
2.3. Tipos de cobertura verde	13
2.4. Sistemas de cobertura verde.....	16
2.4.1. Sistema modular vs sistema convencional	16
2.5. Benefícios das coberturas verdes	18
3. Campanha experimental.....	25
3.1. Sistema modular de cobertura verde	26
3.2. Comportamento térmico.....	29
3.2.1. Montagem e descrição do provete de ensaio.....	30
3.2.2. Procedimento de ensaio.....	34
3.2.3. Resultados	36
3.2.3.1. Situação de inverno	36
3.2.3.2. Situação de verão.....	44
3.3. Comportamento hídrico.....	50
3.3.1. Determinação da drenagem e retenção de água (medição em laboratório).....	50
3.3.1.1. Montagem e descrição do provete de ensaio	50
3.3.1.2. Procedimento de ensaio.....	51
3.3.1.3. Resultados.....	54
3.3.2. Evolução do teor em água (medição no exterior)	59
3.3.2.1. Montagem e descrição dos provetes de ensaio.....	59
3.3.2.2. Procedimento de ensaio.....	61
3.3.2.3. Resultados.....	63

3.4. Comportamento acústico.....	68
3.4.1. Montagem da área de teste e provete de ensaio	69
3.4.2. Procedimento de ensaio.....	71
3.4.3. Resultados	74
4. Conclusões e trabalhos futuros.....	77
4.1. Principais conclusões	77
4.2. Proposta de trabalhos futuros	79
Referências bibliográficas	81

Lista de figuras

Figura 2.1 - Componentes de uma cobertura verde (Fonte: Vijayaraghavan, K., 2016).	10
Figura 2.2 - Representação detalhada de uma cobertura verde extensiva (Fonte: <i>The European Portal for Energy Efficiency in Buildings</i>).	14
Figura 2.3 - Exemplos de coberturas extensivas: a) Cobertura verde extensiva plana, b) Cobertura verde extensiva com inclinação (Fonte: <i>Landlab</i>).....	14
Figura 2.4 - Representação detalhada de uma cobertura verde semi-intensiva (Fonte: <i>The European Portal for Energy Efficiency in Buildings</i>).	14
Figura 2.5 - Exemplos de cobertura verde semi-intensiva (Fonte: <i>Zinco</i>).	15
Figura 2.6 - Representação detalhada de uma cobertura verde semi-intensiva (Fonte: <i>The European Portal for Energy Efficiency in Buildings</i>).	15
Figura 2.7 - Exemplos de cobertura verde intensiva (Fonte: <i>ANCV, Zinco, Neoturf</i>).	16
Figura 2.8 - Esquema da composição dos tabuleiros que constituem o sistema modular de cobertura verde (Adaptado: <i>Vegetal I.D.</i>).....	17
Figura 2.9 - Exemplos de aplicação do sistema modular de cobertura verde: a) e b) Aplicação em cobertura inclinada; c) e d) Aplicação em cobertura plana. (Fonte: <i>Canadian Contractor, Greening Solutions, Wallbarn, Tounesol Siteworks</i>).....	17
Figura 2.10 - Exemplo de instalação de uma cobertura verde convencional: a) Camada de proteção; b) Camada drenante; c) Filtro; d) e e) Aplicação do substrato; f) Aplicação do tapete vegetal (Fonte: <i>ArchiGreen</i>).....	18
Figura 2.11 - Aplicação de coberturas verdes a nível urbano: a) Estacionamento público, Alemanha; b) Abrigo para bicicletas, Inglaterra; c) e f) Paragem de autocarro, EUA e Inglaterra; d) e e) Cobertura verde em veículos urbanos, Barcelona e Nova Iorque; (Fontes: <i>Siebau, Green Roof Shelters, The Guardian, Urban Gardens Web</i>).	19
Figura 2.12 - Efeito ilha de calor urbano (Adaptado: <i>NASA, 2010</i>).	20
Figura 2.13 - Problemas causados por eventos de precipitação intensa (Fonte: <i>New Security Beat, Huffington Post, UrbanSpace</i>).	21
Figura 2.14 - Cobertura verde na gestão das águas pluviais.	21
Figura 2.15 - Contribuição acústica das coberturas verdes nas áreas urbanas.	22
Figura 3.1 - Componentes do sistema de cobertura verde.	27
Figura 3.2 - Composição do sistema modular de cobertura verde: a) Montagem dos tabuleiros; b) Sistema de encaixe entre tabuleiros; c) Tabuleiros com o substrato e o tapete vegetal com vegetação do tipo <i>sedum</i> ; d) Tabuleiro completo com vegetação do tipo <i>sedum</i> , herbáceas e gramíneas.	28
Figura 3.3 - Câmara bioclimática.....	29
Figura 3.4 - Montagem do provete de ensaio: a) Base em laje de betão; b) Colocação do XPS; c) Colocação da manta geotêxtil; d) Colocação dos tabuleiros e da camada drenante as solução	

convencional; e) Colocação do filtro geotêxtil na solução convencional; f) Provedor completo com os dois sistemas.....	30
Figura 3.5 -Representação do esquema de montagem das coberturas verdes com a identificação de cada sistema. A (sistema modular) e B (sistema convencional).....	31
Figura 3.6 - Sensores utilizados no ensaio. a) Sensor do tipo K; b) Sensor tipo PT100; c) Alinhamento dos sensores tipo PT100.	31
Figura 3.7- Colocação do cavalete com sondas PT100.....	32
Figura 3.8 - Sensores: a) Fluxímetro Hukseflux HFP01; b) Fluxímetro colocados na superfície do XPS.	32
Figura 3.9 - Localização e alinhamento dos sensores.	33
Figura 3.10 - Sistema de rega instalado na câmara bioclimática.	34
Figura 3.11 - Condições impostas na câmara bioclimática, para simular a situação de inverno; a) regime permanente; b) regime variável.	35
Figura 3.12 – Condições impostas na câmara bioclimática, para simular a situação de verão; a) regime permanente; b) regime variável.	35
Figura 3.13 - Temperaturas medidas na zona A (cobertura verde modular), ao longo de 72 horas (inverno - regime permanente seco).....	37
Figura 3.14 - Temperaturas medidas na zona B (cobertura verde convencional) ao longo de 72 horas (inverno - regime permanente seco).	37
Figura 3.15 - Fluxos de calor medidos na superfície inferior da laje (TF1_A e TF1_B) e sobre o XPS (TF2_A e TF2_B), nas duas soluções de cobertura verde (inverno - regime permanente seco).	38
Figura 3.16 - Temperaturas medidas na zona A (cobertura verde modular) ao longo de 72 horas (inverno - com chuva).	39
Figura 3.17 - Temperaturas medidas na zona B (cobertura verde convencional) ao longo de 72 horas (inverno - com chuva).....	40
Figura 3.18 - Fluxos de calor medidos na superfície inferior da laje (TF1_A e TF2_A) e sobre o XPS (TF2_A e TF2_B), nas duas soluções de cobertura verde (inverno - com chuva).	40
Figura 3.19 -Temperaturas medidas na zona A (cobertura verde modular) ao longo de 72 horas (inverno - regime variável seco).....	41
Figura 3.20 - Temperaturas medidas na zona B (cobertura verde convencional) ao longo de 72 horas (inverno - regime variável seco).	42
Figura 3.21 - Fluxos de calor medidos na superfície inferior da laje (TF1_A e TF2_A) e sobre o XPS (TF2_A e TF2_B), nas duas soluções de cobertura verde (inverno - regime variável seco).	42
Figura 3.22 - Temperaturas medidas na zona A (cobertura verde modular) ao longo de 72 horas (inverno - regime variável com chuva).	43
Figura 3.23 - Temperaturas medidas na zona B (cobertura verde modular) ao longo de 72 horas (Inverno - regime variável com chuva).	43

Figura 3.24 - Fluxos de calor medidos na superfície inferior da laje (TF1_A e TF2_A) e sobre o XPS (TF2_A e TF2_B), nas duas soluções de cobertura verde (inverno- regime variável com chuva).	44
Figura 3.25 - Temperaturas medidas na zona A (cobertura verde modular) ao longo de 72 horas (verão com chuva).....	45
Figura 3.26 - Temperaturas medidas na zona B (cobertura verde convencional) ao longo de 72 horas (verão com chuva).	45
Figura 3.27 - Fluxos de calor medidos na superfície inferior da laje (TF1_A e TF2_A) e sobre o XPS (TF2_A e TF2_B), nas duas soluções de cobertura verde (verão com chuva).....	46
Figura 3.28 - Temperaturas medidas na zona A (cobertura verde modular) ao longo de 72 horas (verão - regime variável seco).....	47
Figura 3.29 - Temperaturas medidas na zona B (cobertura verde convencional) ao longo de 72 horas (verão - regime variável seco).	47
Figura 3.30 - Fluxos de calor medidos na superfície inferior da laje (TF1_A e TF2_A) e sobre o XPS (TF2_A e TF2_B), nas duas soluções de cobertura verde (verão – regime variável seco). ...	48
Figura 3.31 - Temperaturas medidas na zona A (cobertura verde modular) ao longo de 72 horas (verão - regime variável com chuva).	48
Figura 3.32 - Temperaturas medidas na zona B (cobertura verde convencional) ao longo de 72 horas (verão - regime variável com chuva).	49
Figura 3.33 - Fluxos de calor medidos na superfície inferior da laje (TF1_A e TF2_A) e sobre o XPS (TF2_A e TF2_B), nas duas soluções de cobertura verde (verão – regime variável com chuva).	49
Figura 3.34 - Sistema de cobertura verde (TLFSV1).....	51
Figura 3.35 - Sistema de cobertura verde (TLFSV2).....	51
Figura 3.36 - Dispositivo experimental para ensaios de escoamento.	52
Figura 3.37 - Massa de água escoada acumulada ao longo dos primeiros 60 minutos após descarga para ensaio sem tabuleiro (perfil de referência) e o ensaio com tabuleiro vazio.....	55
Figura 3.38 - Massa de água escoada acumulada nas três descargas efetuadas, num período de 60 min, para o sistema de cobertura verde TLFSV1.	55
Figura 3.39 - Massa de água escoada acumulada nas três descargas efetuadas, num período de 60 min, para o sistema de cobertura verde TLFSV2.	56
Figura 3.40 - Massa de água escoada acumulada em função do tempo para as três descargas aplicadas aos dois sistemas de cobertura verde TLFSV1 e TLFSV2.....	57
Figura 3.41 - Caudal de escoamento para as três descargas aplicadas, num período de 60 minutos, para o módulo TLFSV1.....	58
Figura 3.42 - Caudal de escoamento para as três descargas aplicadas, num período de 60 minutos, para o módulo TLFSV2.....	59
Figura 3.43 - Módulos ensaiados, descrição e o peso em estado saturado.	61

Figura 3.44 - Equipamento de pesagem e módulos ensaiados: a) Balança utilizada para as pesagens, b) Localização dos módulos: 1. TL, TS, TLFS, TLFSV2 colocados à sombra; 2. TLFSV1 colocado ao sol.	61
Figura 3.45 - Massa de água perdida, temperatura, radiação solar, humidade relativa e vento registados ao longo do dia 1.	64
Figura 3.46 - Massa de água perdida, temperatura, radiação solar, humidade relativa e vento registados ao longo do dia 2.....	65
Figura 3.47 - Massa de água perdida, temperatura, radiação solar, humidade relativa e vento registados ao longo do dia 3.....	66
Figura 3.48 - Massa de água perdida, temperatura, radiação solar, humidade relativa e vento registados ao longo do dia 9.....	67
Figura 3.49 - Massa de água perdida, temperatura, radiação solar, humidade relativa e vento registados ao longo do dia 10.....	67
Figura 3.50 - Câmara acústica: a) Exterior da câmara; b) Aparelhos de medição no interior da câmara; c) Elementos difusores colocados no teto da câmara.	68
Figura 3.51 - Esquema de montagem do provete de ensaio.....	69
Figura 3.52 - Provede de ensaio selado com moldura acusticamente refletora.	70
Figura 3.53 Instrumentos de medição: a) Fonte sonora; b) Microfone e tripé.....	71
Figura 3.54 - Provede de ensaio colocado na câmara reverberante.	73
Figura 3.55 - Coeficiente de absorção sonora obtido para cada estado caracterizado, α_w , Classe de absorção e SAA.	75

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Valores da massa total de água drenada e retida no módulo em 24 horas.....	56
Tabela 3.2 - Período de tempo, em minutos, gasto para drenar 25%, 50% e 75% da massa total de água aplicada nos módulos ensaiados.	57
Tabela 3.3 - Valores médios da radiação solar, temperatura exterior e humidade relativa durante os 10 dias de ensaio.....	63
Tabela 3.4 - Valores de temperatura, humidade relativa e pressão atmosférica da câmara reverberante durante os ensaios.....	71
Tabela 3.5 - Coeficientes de absorção sonora, α_s , obtidos para cada estado caracterizado.....	76

1. Introdução

1.1. Enquadramento e motivação

De acordo com o Banco Mundial, mais de metade da população mundial vive nas cidades e esta proporção continua a aumentar. Prevê-se que em 2050 esta proporção chegue aos 70%. Este aumento leva ao crescimento acelerado das áreas urbanas e a uma inevitável reestruturação das cidades e das suas políticas urbanas, de modo a ajudar a atenuar os diversos problemas ambientais que tem vindo a surgir.

O aumento da temperatura do ar nas cidades mais urbanizadas é devido ao crescimento da área construída e à existência de grandes superfícies impermeabilizadas, tais como, ruas, passeios, paredes e coberturas, que absorvem a energia solar ao longo do dia libertando-a à noite em forma de calor. Este calor libertado permanece na atmosfera urbana formando um fenómeno conhecido como Ilha de Calor Urbano (ICU).

Com a redução das áreas permeáveis das cidades, devido ao aumento das áreas impermeáveis, mais de metade da precipitação é perdida por escorrência superficial em comparação com as áreas verdes. Assim sendo, a ocorrência de fortes precipitações leva à sobrecarga dos sistemas de drenagem públicos aumentando o risco de cheias.

Com o crescimento da população e das cidades, cresce também o ruído proveniente do tráfego rodoviário, ferroviário e aéreo. A existência de áreas verdes contribui para a melhoria da qualidade acústica, tanto do ambiente interior como exterior, devido à sua capacidade de absorção e isolamento sonoro.

Com estas preocupações, surge uma crescente atenção às questões ambientais e a procura de soluções mais sustentáveis por parte das sociedades atuais. Neste contexto, as coberturas verdes surgem como uma alternativa, mais sustentável e ecológica, às coberturas convencionais, podendo beneficiar especialmente os meios urbanos, e mitigar a redução drástica de áreas verdes que caracterizam o crescimento das grandes cidades (Santamouris, 2014).

Em Portugal, a implementação deste tipo de coberturas tem vindo a aumentar e consequentemente as tecnologias associadas tem vindo a evoluir. As vantagens das coberturas verdes têm favorecido o aparecimento de novas soluções no mercado, nomeadamente de

soluções modulares que são uma alternativa à solução convencional de cobertura verde. Os sistemas modulares de cobertura verde oferecem maior flexibilidade em relação ao sistema convencional, visto que, simplificam a preparação e instalação em obra, são de fácil manutenção e simplificam uma substituição. Além disso, facilitam a sua utilização em situações de reabilitação e em coberturas inclinadas. No entanto, estas soluções carecem de caracterização, uma vez que as opções existentes no mercado não apresentam na sua ficha técnica as propriedades associadas às vantagens do uso de coberturas verdes. É, por isso, necessário obter parâmetros que possam ser úteis para calcular o benefício do seu uso, não só à escala do edifício, mas também à escala urbana.

A cobertura verde é composta pela adição de camadas de substrato, vegetação, filtro geotêxtil, camada drenante, camada de proteção, barreira anti raiz, isolamento e membrana impermeabilizante, sobre uma cobertura tradicional. Note-se que as soluções de coberturas verdes são sistemas bastante dinâmicos, uma vez que o teor em água do substrato está constantemente a variar e, com ele, as propriedades do sistema. Também o desenvolvimento das plantas e o seu estado, pelos efeitos de transpiração e evapotranspiração, contribuem particularmente para esse dinamismo de comportamento, sendo assim, difícil simular o comportamento numericamente. Nesse sentido, a caracterização experimental dos sistemas deve ser o mais completa possível, devendo-se identificar as características mais preponderantes para o seu comportamento, como por exemplo, a influência do tipo de vegetação, do seu grau de desenvolvimento, do teor em água da solução, etc.

1.2. Objetivos

Com base na motivação apresentada anteriormente, pretende-se avaliar um sistema modular de cobertura verde e reforçar as suas vantagens que podem ser não só a nível do edifício, como também à escala urbana, como bairros ou cidades. Para isso, foi realizada uma campanha experimental cujos objetivos principais são a avaliação dos seguintes pontos:

- Comportamento térmico: através da caracterização das suas temperaturas superficiais que poderão ter um impacto positivo na mitigação das ilhas de calor urbano;
- Comportamento hídrico: através da avaliação da capacidade de retenção as águas pluviais e consequentemente contribuir para o atraso do seu escoamento através dos sistemas de drenagem, evitando cheias;

- Comportamento acústico: através da quantificação da absorção sonora que contribuirá para a redução dos níveis de ruído urbano e para melhorar a qualidade acústica do ambiente, interior ou exterior.

Para se cumprir este objetivo foi necessário:

- Fazer o levantamento das soluções de cobertura verde existentes no mercado;
- Selecionar e definir o sistema modular de cobertura verde;
- Identificar variáveis que possam influenciar o desempenho das soluções passíveis de serem estudadas na campanha experimental;
- Definir os procedimentos de ensaio para a determinação da absorção sonora, comportamento térmico, drenagem e retenção de água;
- Preparar os equipamentos e cadeias de medida;
- Preparar os provetes, implementar e realizar os ensaios;
- Analisar os resultados.

1.3. Estrutura da dissertação

A dissertação está estruturada em 4 capítulos. Este primeiro capítulo faz uma introdução ao trabalho, apresentando o enquadramento do tema e os objetivos da dissertação.

No capítulo 2 apresenta-se o estado da arte do tema, aprofundando o conceito de cobertura verde, identificando os vários tipos e a sua constituição, bem como os benefícios e desvantagens com base em estudos e pesquisas realizados na área.

O capítulo 3 incide sobre a campanha experimental onde são apresentados os diferentes ensaios realizados, descrevendo-se os procedimentos experimentais e os resultados obtidos em cada campanha experimental. Fez-se a análise dos resultados destacando-se as conclusões principais.

Por fim, no capítulo 4 apresentam-se as principais conclusões resultantes do estudo experimental e é feita a sugestão de trabalhos futuros com interesse no tema em estudo e possível desenvolvimento do mesmo.

2. Estado da arte

2.1. Introdução

As coberturas e paredes verdes são usadas há séculos. O seu uso data desde as antigas civilizações do vale dos rios Tigre e Eufrates. O exemplo mais conhecido é o dos jardins suspensos da Babilónia. Foram encontrados diversos registos históricos sobre o uso de coberturas verdes, durante os séculos XIII, XIV e XV, em diversas cidades em França e Itália, onde tinham o objetivo de ornamentar as suas construções. Na Rússia, o uso desta solução era um sinal de ostentação pela nobreza. Já no século XX, arquitetos fundadores do movimento moderno, como Le Corbusier, entendiam as coberturas verdes como um avanço tecnológico e estético.

O desenvolvimento das técnicas construtivas e materiais de construção levou ao desenvolvimento e expansão do uso de jardins na cobertura e dos jardins verticais. O seu uso contemporâneo não só contribui para o aspeto estético dos edifícios como também beneficia os meios urbanos, melhorando a qualidade dos ambientes aos quais estamos expostos. As coberturas verdes têm vindo a ser usadas em edifícios novos e em reabilitações em diversos países, com diferentes condições climáticas.

A Alemanha, o líder mundial no investimento da tecnologia das coberturas verdes, começou a sua implementação no início do período de industrialização e, até 2003, representavam 14% do total de coberturas planas (Castleton et al., 2010). Desde então, segundo a *World Green Infrastructure Network*, são construídos por ano na Alemanha aproximadamente 11 milhões de metros quadrados de coberturas verdes (WGIN, 2018). Segundo o *Senate Department for Urban Development and Housing*, em Berlim, 3.9% das áreas de cobertura, incluindo estacionamentos subterrâneos, são verdes. Destas, 3.3% são coberturas do tipo extensiva e os restantes 0.6% do tipo intensiva (*Green Roofs*, 2017). O sucesso desta tecnologia, na Alemanha, deve-se também às políticas de incentivos governamentais ao uso desta solução construtiva e a uma política de obrigatoriedade da construção de áreas verdes.

Hoje em dia, as coberturas verdes encontram-se espalhadas pelo mundo. Em Portugal, as coberturas verdes começaram a surgir nos anos 60. Apesar de não existir qualquer incentivo ou regulamento sobre a construção deste sistema de cobertura, existem já algumas construções que implementaram este tipo de solução. São bons exemplos a estação de metro da Trindade (Porto),

Praça Lisboa (Porto), Etar de Alcântara (Lisboa), Fundação Calouste Gulbenkian (Lisboa), entre muitas, incluindo moradias particulares e prédios de habitação. Ainda em Portugal, em 2015, foi criada a Associação Nacional de Coberturas Verdes (ANCV), associação sem fins lucrativos, que tem por objetivo principal a promoção das coberturas verdes como parte das estratégias ambientais e energéticas. Atualmente, diversos estudos e pesquisas relacionados com a temática das coberturas verdes têm vindo a ser desenvolvidos.

Um dos maiores desafios da atualidade tem a ver com as questões ambientais. Segundo Berardi et al. (2014), as coberturas verdes ajudam na atenuação dos efeitos negativos provenientes do crescimento urbano, como a elevada taxa de poluição do ar, perda de biodiversidade e o efeito de ilha de calor urbano. Esta última consequência ambiental tem sido muito estudada e documentada por vários pesquisadores.

Num estudo conduzido por Dvorak e Volder (2012) onde foram utilizados 12 módulos de cobertura verde, em polipropileno, de 60 cm por 60 cm e 11.4 cm de profundidade, observaram que estes, mesmo sem rega, reduzem significativamente as temperaturas no solo, o que comprova a influência do solo e o tipo de vegetação no sistema de cobertura verde. Ao mesmo tempo, verificaram uma redução de 50°C para 17°C na amplitude térmica registada, respetivamente, na superfície convencional e na base do substrato da cobertura verde. Este estudo foi realizado para um clima subtropical, que é normalmente quente e seco, o que demonstra a capacidade destes sistemas para aguentarem temperaturas altas, sem irrigação periódica, e ainda assim contribuir na diminuição da temperatura do ar exterior. Segundo Costanzo et al. (2015), o conhecimento das temperaturas superficiais das coberturas é fundamental para quantificar o seu efeito na mitigação dos efeitos das ilhas de calor urbano, visto que a temperatura superficial das construções influencia a temperatura do ar no ambiente urbano.

Também Sun et al. (2016) conduziram um estudo para avaliar a eficácia das coberturas verdes e os resultados sugeriram que as coberturas verdes diminuem a temperatura do ar próximo à superfície e a velocidade do vento, mas aumentam a humidade atmosférica. Mais uma vez, conclui-se que a instalação de coberturas verdes mitiga o efeito da ilha de calor urbano devido ao efeito de arrefecimento por evaporação. Bevilacqua et al. (2016) realizou um estudo experimental no sul de Itália em que comparou uma cobertura verde extensiva e uma cobertura convencional, para as estações de inverno e verão. Os resultados do estudo indicaram que a

cobertura verde, no verão, é capaz de reduzir as temperaturas superficiais, em média, 12°C em relação à cobertura convencional e, no inverno, mantém as temperaturas médias 4°C acima.

Segundo Simmons et al. (2008), ao aumentar as áreas verdes pode-se estar a contribuir para a diminuição de cheias e de sobrecargas nas redes de saneamento nas zonas urbanas, pela capacidade que o solo tem em reter a água das chuvas. A capacidade de retenção e drenagem das águas pluviais também é uma característica e benefício das coberturas verdes. Muitos autores afirmam que a redução no escoamento das águas pluviais é o benefício ambiental mais importante deste tipo de cobertura.

Num estudo realizado por Kikuchi e Koshimizu (2013), os autores fazem uma comparação entre três tipos de coberturas: a convencional, uma cobertura verde tradicional e outra com uma camada drenante. Os resultados do estudo indicam que a cobertura verde tradicional foi capaz de reduzir o escoamento em 71.7% enquanto que a cobertura verde com a camada drenante reduz em 57%. GhaffarianHoseini et al. (2015), reforçam que uma cobertura verde extensiva é capaz de reter até 55% da água das chuvas anuais, tendo a capacidade de controlar o escoamento das águas pluviais urbanas, diminuindo a probabilidade de inundações.

Loiola et al. (2018) conduziram um estudo no Rio de Janeiro (Brasil), onde avaliaram o comportamento hidrológico de três tipos diferentes de tabuleiros de cobertura verde, quanto à sua capacidade de retenção e escoamento das águas pluviais, em comparação, com uma cobertura em fibrocimento. Para os três tipos de tabuleiros, os resultados indicaram uma redução no escoamento de 31% a 85%. Os autores reforçam que a escolha das plantas, do substrato e os fatores climáticos podem influenciar os resultados obtidos.

Com foco na acústica à escala urbana, a experiência conduzida por Yang et al. (2012) provou que as coberturas verdes contribuem para a atenuação considerável do ruído ao nível da rua, numa área urbana, devido ao elevado coeficiente de absorção sonora da camada vegetal da cobertura verde. Esta característica é mais evidente em coberturas verdes instaladas em edifícios ou estruturas baixas, como por exemplo a cobertura de um estacionamento subterrâneo. De facto, para que a camada vegetal constitua uma superfície de absorção efetiva, deverá estar exposta diretamente à área onde há propagação de ruído. Neste mesmo estudo, os autores testaram um sistema de cobertura verde em tabuleiros plásticos composta por: camada drenante no fundo do tabuleiro, uma membrana geotêxtil por cima desta, que atua como filtro

e previne que pequenas partículas do substrato possam obstruir a camada drenante, uma membrana plástica a revestir as paredes do tabuleiro e substrato.

Um estudo conduzido por Dunnett and Kingsbury (2008) mostrou que uma cobertura verde colocada, no aeroporto de Frankfurt, com 10 cm de substrato, permitiu reduzir pelo menos 5 decibéis os níveis sonoros. Estudos realizados por Timothy Van Renterghem e Dick Botteldooren mostram que as coberturas verdes, extensivas e intensivas, reduzem a difração das ondas num edifício. Através de um modelo numérico simularam a propagação do som na camada do substrato. Os autores concluíram que as coberturas verdes extensivas com espessuras compreendidas entre 15 e 20 cm, no geral apresentam picos de atenuação mais acentuados com a variação da espessura do substrato em frequências mais alta. Nas coberturas intensivas onde geralmente a espessura do substrato excede os 20 cm, não mostraram efeitos positivos resultantes do aumento da espessura do substrato. Van Renterghem et al. 2015 estudaram formas de redução da propagação do ruído ao ar livre causado pelo tráfego com recurso a soluções naturais. Neste estudo, foram revistas outras pesquisas dos autores acerca da mitigação de ruído com recurso a este tipo de soluções. Após testes em laboratório, avaliações numéricas e também com ensaios *in-situ*, os autores concluíram que a escolha de uma delas depende do contexto em que ela será inserida, rural ou urbano, da área de implantação das soluções e da posição do recetor.

Num estudo realizado por Manso et al. (2018), foi analisado um sistema modular para superfícies verdes, que pode ser instalado na vertical (paredes), na horizontal (coberturas) e ainda em superfícies inclinadas (paredes e coberturas), composto por uma base em cortiça, substrato e vegetação. O estudo foi realizado em câmara reverberante, para a obtenção do coeficiente de absorção sonora, foram testadas quatro amostras, duas delas referentes ao mesmo sistema, mas cada uma com vegetação de diferentes alturas (7-8 cm e 30 cm). As outras amostras usadas para referência são compostas por: uma com base em cortiça e outra com a base em cortiça e substrato. O resultado mais baixo foi para a amostra só com cortiça com um coeficiente de absorção sonora (α_w) de 0.4, ao adicionar o substrato obteve-se um valor de 0.55. O impacto da vegetação mostrou ser significativo, aumentando o coeficiente de absorção sonora (α_w) para 0.75 e 0.8. Apesar dos bons resultados apresentados pelo sistema, os autores reforçam que a escolha das plantas, do substrato e do *design* do sistema podem influenciar nos resultados.

António et al. (2016) realizaram um estudo experimental em que foram analisadas as características de absorção sonora de dois substratos para coberturas verdes, em tubo de

impedância e em câmara reverberante. As amostras ensaiadas consistiram em dois tipos de substratos (um mais orgânico e outro menos orgânico), e dois tapetes de vegetação (um constituído por relva e o outro por *sedum*, herbáceas e gramíneas) aplicados sobre um dos substratos. Os resultados do estudo indicam que com o aumento da espessura do substrato, de uma forma geral, aumenta a absorção sonora. Há uma exceção quando o substrato é seco, numa gama específica de frequências, em que as menores espessuras de substrato apresentam maior absorção sonora. O substrato mais orgânico apresentava maior absorção sonora do que o menos orgânico. A vegetação aplicada no substrato à base de tapete de relva apresentou valores de absorção sonora mais baixos em relação ao de mistura de *sedum*, herbáceas e gramíneas. Os autores concluíram com este estudo que o substrato pode ter um enorme contributo na absorção sonora, desde que a vegetação seja dispersa e exista substrato à vista.

António et al. (2018) conduziram um estudo onde foi avaliada a contribuição das coberturas verdes no isolamento acústico. Foram caracterizadas duas soluções de cobertura verde, uma convencional e outra não convencional. O estudo foi realizado em câmara acústica. O sistema convencional tinha a seguinte constituição: barreira anti raiz, poliestireno extrudido, elemento de armazenamento e drenagem de água, filtro de polipropileno, substrato e vegetação. A solução não convencional, apresentava a mesma constituição substituindo o elemento de armazenamento e drenagem de água, por uma camada de aglomerado de cortiça expandida. O aglomerado de cortiça expandida é um material natural e ecológico, e foi utilizado com a função de camada drenante e de retenção assim como de isolamento térmico. Os resultados deste estudo confirmaram que as duas soluções apresentaram resultados semelhantes e satisfatórios no isolamento acústico. Os autores concluíram que, a solução não convencional, apresentada neste estudo, poder ser uma boa alternativa e mais ecológica em relação à solução convencional por ter na sua composição uma camada de aglomerado de cortiça expandida.

2.2. Constituição das coberturas verdes

As coberturas verdes, ao contrário do que pode aparentar, são complexas não só por apresentarem várias camadas com comportamentos específicos e necessárias para o seu bom funcionamento, mas também pelo rigor necessário na sua implementação. As coberturas verdes, por serem constituídas por elementos naturais, são um sistema com um comportamento bastante dinâmico. Logo, é importante conhecer cada elemento das coberturas verdes, visto que, cada um apresenta um comportamento e funções específicos. A figura 2.1 mostra um esquema da estrutura típica de uma cobertura verde que contém as seguintes camadas funcionais: vegetação, substrato, filtro, camada drenante, camada de proteção, barreira anti raiz, isolamento e membrana de impermeabilização.



Figura 2.1 - Componentes de uma cobertura verde (Fonte: Vijayaraghavan, K., 2016).

Vegetação

A escolha das plantas numa cobertura verde depende sempre do tipo de cobertura verde, da sua finalidade de utilização e também do clima local. A vegetação assume um papel importante na redução do caudal das águas da chuva, uma vez que as plantas retêm e absorvem a água, libertando-a através do processo de evapotranspiração. Em conjunto com o processo de evapotranspiração, através do efeito sombra, potencia um bom desempenho térmico. Além disso, melhoram a qualidade do ar, filtram as águas da chuva, servem de habitat e alimento para algumas espécies de animais, etc.

O tipo de vegetação pode ir desde as espécies mais comuns de relva, arbusto de baixa manutenção até plantas ornamentais e árvores que necessitem de manutenção regular. De entre as variedades de espécies, o mais popular é o *sedum*, que é capaz de se adaptar com facilidade a vários tipos de clima, tem elevada capacidade de armazenamento de água (o que permite a sobrevivência em condições de seca). As suas raízes são superficiais o que não permite a penetração das mesmas no elemento estrutural, não sendo necessário uma barreira anti raiz, apresenta menor crescimento de ervas daninhas e erosão do solo menos acelerada (Vijayaraghavan, 2016).

A influência da vegetação na absorção sonora é menos óbvia, isto porque as plantas apresentam uma fisiologia complexa. Apesar de algumas espécies de plantas terem uma boa capacidade de absorção sonora, o sistema acústico formado pela camada vegetal e substrato (material poroso) é também complexo. Vários estudos mostraram que, geralmente, nas frequências mais baixas, existe uma melhoria na absorção sonora do sistema (planta – substrato), enquanto que nas frequências mais altas a vegetação leva a uma diminuição na absorção sonora em relação ao substrato (Van Renterghem, 2017).

Substrato

O substrato é essencial para o crescimento e viabilidade da vegetação, e contribui para a retenção das águas da chuva, comportamento térmico e acústico. Para um bom desempenho hídrico (drenagem e retenção), a composição e características da camada do substrato são as consideradas de extrema importância na contribuição para a capacidade de retenção (condições de seca) e no atraso do escoamento de água (condições de pico de cheia). Porém, não é fácil contemplá-las todas num substrato. Por exemplo, a baixa massa volúmica aparente conseguida através de constituintes leves, pode comprometer a estabilidade do substrato e a fixação das plantas. O uso de partículas pequenas e o aumento da matéria orgânica, como tentativa de aumentar a retenção de água, pode afetar a porosidade e a condutividade hidráulica do substrato (Vijayaraghavan, 2016). Posto isto, é fundamental o desenvolvimento de estudos experimentais nesta temática, no sentido em que se otimize o substrato como um todo, e poder corresponder às exigências que lhe competem.

A espessura, a densidade e a humidade são as principais características do substrato que contribuem para o desempenho térmico das coberturas verdes. Estas características são importantes uma vez que podem afetar a condutibilidade térmica do substrato e consequentemente o fluxo de calor. O aumento da humidade e ou da densidade leva ao aumenta

da condutibilidade térmica aumentando o fluxo de calor. Quanto mais espessura tiver o substrato maior é a resistência térmica no sistema.

Do ponto de vista acústico, o substrato tem de ter entre as suas características, uma porosidade adequada, por forma a permitir a penetração das ondas sonoras no mesmo, sendo então, genericamente, um solo granular o mais adequado. A espessura do substrato também tem um papel importante na absorção sonora, quanto maior a espessura da camada de substrato maior o índice de redução sonora (Conelly and Hodgson, 2015).

A escolha do substrato adequado é essencial para o bom funcionamento de uma cobertura verde. Vários investigadores, recomendam o uso dos substratos que são compostos por materiais disponíveis localmente, para um determinado tipo de plantas, condições climáticas e nível de manutenção. O uso de substrato não comercializado, por exemplo as alternativas *low-cost*, ou direcionados para a jardinagem, não são aconselhados pois tem desvantagens associadas, nomeadamente: deficiente retenção de água e pouco arejamento, elevado peso, potencial para o desenvolvimento de ervas daninhas, perda de nutrientes por lixiviação e elevada capacidade de compactação (Vijayaraghavan, 2016).

Filtro

O objetivo desta camada é de impedir que partículas mais finas do substrato, com o escoamento da água, provoquem o entupimento do sistema drenante, mantendo a integridade do substrato e da vegetação. Este filtro é constituído normalmente por um geotêxtil.

Camada drenante

Camada com função de gerir o escoamento das águas, responsável pela drenagem das águas pluviais e regulação da retenção da mesma. A acumulação de água na cobertura pode provocar excesso de peso na estrutura do edifício e também a morte de algumas plantas.

Camada de proteção

A camada de proteção é essencial para proteger o sistema de impermeabilização, evitando danos causados pelo processo de instalação ou construção. São normalmente utilizados para este fim feltros geotêxteis (densidades e espessuras adequadas), esteiras ou placas de borracha ou esteiras ou placas de plástico, normalmente de 4 a 6 mm de espessura.

Barreira anti raíz

A barreira de raízes protege a impermeabilização da cobertura da penetração das raízes das plantas. As camadas anti raíz podem ser constituídas por uma camada fina de polietileno de alta densidade, filmes de PVC ou geotêxteis de polipropileno impregnados com produtos químicos à base de inibidores de raízes.

Isolamento térmico

O isolamento térmico permite controlar as trocas de calor entre os ambientes interior e exterior. A aplicação do isolamento térmico deve ter em conta a espessura do substrato, quando maior for a espessura de substrato menor é a necessidade do isolamento térmico, já que o substrato também tem capacidade isolante.

Camada de impermeabilização

Esta camada tem como função crucial assegurar a estanquidade do edifício. Existem no mercado vários sistemas de impermeabilização sendo o de uso mais tradicional as soluções como asfaltos ou emulsões betuminosas e membranas PVC, telas ou filtros betuminosos. Esta camada poderá assumir simultaneamente a função de barreira anti raiz caso cumpra os requisitos de resistência à penetração de raízes.

2.3. Tipos de cobertura verde

As coberturas verdes podem ser classificadas como extensivas, semi-intensivas e intensivas. Esta classificação tem em conta a espessura do substrato, tipo de vegetação, tipo de utilização, custo associado, instalação e manutenção.

Coberturas extensivas

As coberturas verdes extensivas são leves e são ideais para serem instaladas em coberturas já existentes e que não suportam cargas excessivas e, comparativamente às coberturas do tipo semi-intensiva e intensiva, podem ser instaladas em coberturas com inclinação até 35°. Neste último caso dever-se-á ter atenção para evitar o deslizamento de terras e plantas.

Na figura 2.2 está representada a composição típica de uma cobertura verde extensiva. Este tipo de cobertura verde geralmente não é acessível, a camada de substrato não é superior a 15 cm e a vegetação é rasteira como musgos, relva e outras plantas com grande resistência às condições climáticas.



Figura 2.2 - Representação detalhada de uma cobertura verde extensiva (Fonte: *The European Portal for Energy Efficiency in Buildings*).

As coberturas verdes extensivas são vantajosas devido ao seu baixo custo de implementação em relação às outras soluções e à baixa manutenção. Oferecem bom isolamento, aumentam a biodiversidade local e são ideais para integrar outras tecnologias verdes como painéis solares. Na figura 2.3 são apresentados exemplos deste tipo de cobertura.



a)

b)

Figura 2.3 - Exemplos de coberturas extensivas: a) Cobertura verde extensiva plana, b) Cobertura verde extensiva com inclinação (Fonte: *Landlab*)

Cobertura verde semi-intensiva

A cobertura verde semi-intensiva é uma solução intermédia entre a extensiva e a intensiva, tem uma camada de substrato que varia entre os 15 cm e os 25 cm. É acessível, permite uma maior variedade de plantas e requer manutenção regular como rega e fertilização. Na figura 2.4 está representada a composição típica de uma cobertura verde semi-intensiva.



Figura 2.4 - Representação detalhada de uma cobertura verde semi-intensiva (Fonte: *The European Portal for Energy Efficiency in Buildings*).

Para implementar este tipo de coberturas são também necessários cálculos estruturais para o dimensionamento da laje de cobertura de acordo com a função do espaço verde que se pretende. Em relação à cobertura extensiva retém mais água, o custo de implementação é intermédio e oferece melhor isolamento. Na figura 2.5 são apresentados exemplos deste tipo de cobertura.



Figura 2.5 - Exemplos de cobertura verde semi-intensiva (Fonte: Zinco).

Cobertura verde intensiva

O sistema de cobertura verde intensiva é mais pesado e tem uma camada de substrato com maior altura, acima dos 20 cm, permitindo uma maior diversidade de plantas desde herbáceas a árvores de pequeno porte, como se pode ver na figura 2.6. Para implementar este tipo de cobertura a estrutura do edifício deverá ser projetada para poder suportar o seu peso, logo este sistema não é aconselhável para edifícios já existentes. A cobertura intensiva é ideal para edifícios com coberturas planas ou terraços. Como é acessível, é comum ser usada como jardim e espaço de estar e lazer, oferecendo um grande potencial para *design*. Contudo, este tipo de cobertura requer manutenção regular, rega constante e fertilização assegurada, tem um custo de implementação mais elevado em relação à cobertura extensiva e semi-intensiva.



Figura 2.6 - Representação detalhada de uma cobertura verde semi-intensiva (Fonte: *The European Portal for Energy Efficiency in Buildings*).

As coberturas intensivas contribuem para o aumento significativo da biodiversidade pela possibilidade de criação de ecossistemas mais complexos. Na figura 2.7 são apresentados alguns exemplos deste tipo de cobertura.



Figura 2.7 - Exemplos de cobertura verde intensiva (Fonte: ANCV, Zinco, Neoturf).

2.4. Sistemas de cobertura verde

O sistema de cobertura verde tem vindo a crescer e a tecnologia a evoluir. Estas soluções são populares pelos seus diversos benefícios ambientais e há uma necessidade de garantir a uniformidade, qualidade e a fiabilidade dos produtos (Dunnet e Kingsbury, 2008). Os sistemas existentes no mercado procuram responder a objetivos específicos, sendo um deles minimizar o declínio ambiental nas áreas urbanas, a fim de explorar os benefícios que este tipo de cobertura pode trazer. Podemos encontrar, no mercado, diferentes de soluções de coberturas verdes que se diferenciam pelo seu tipo de instalação e modo de aplicação: cobertura verde do tipo modular e cobertura verde convencional, esta última também conhecida como cobertura verde contínua ou cobertura verde tradicional.

2.4.1. Sistema modular vs sistema convencional

O sistema modular de cobertura verde é uma tecnologia que está a tornar-se popular e surge como alternativa à solução convencional de cobertura verde. Este sistema traz todos os benefícios de uma cobertura verde resolvendo as limitações da cobertura verde convencional. O sistema convencional é mais complexo em questões de instalação e manutenção, não podendo ser substituído com facilidade, e mais dispendioso em tempo e custo de instalação em relação ao sistema modular. O sistema modular com tabuleiros é o mais comum. Basicamente, este sistema, é constituído por tabuleiros ou módulos, interligados, normalmente compostos por agregado leve de argila expandida (LECA), filtro drenante, substrato e a vegetação, como

mostra a figura 2.8, e tem na sua base furos, devidamente dimensionados, que permitem que a água drene livremente sobre a superfície por baixo dos tabuleiros. Este sistema, uma vez que cada módulo é uma unidade independente, faz com que haja menores possibilidades de movimentos laterais de água e nutrientes ou de propagação de plantas, acima e abaixo do substrato. Os tabuleiros ou módulos são, na maior parte das vezes, fabricados em polipropileno reciclado ou em polietileno de alta densidade reciclado, são leves e permitem serem preenchidos com as camadas funcionais da cobertura verde *in situ* ou podem ser pré-plantados e posteriormente instalados no local.

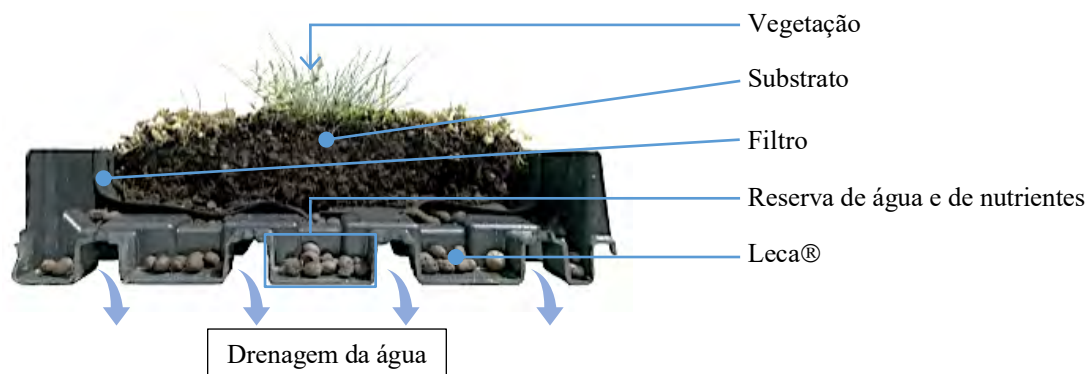


Figura 2.8 - Esquema da composição dos tabuleiros que constituem o sistema modular de cobertura verde (Adaptado: *Vegetal I.D.*).

O sistema modular apresenta múltiplas vantagens em relação ao sistema convencional, nomeadamente flexibilidade e facilidade de instalação, manutenção e eventual substituição, além de facilitar a sua utilização em situações de reabilitação e na instalação em coberturas inclinadas, como podemos ver em alguns exemplos na figura 2.9.

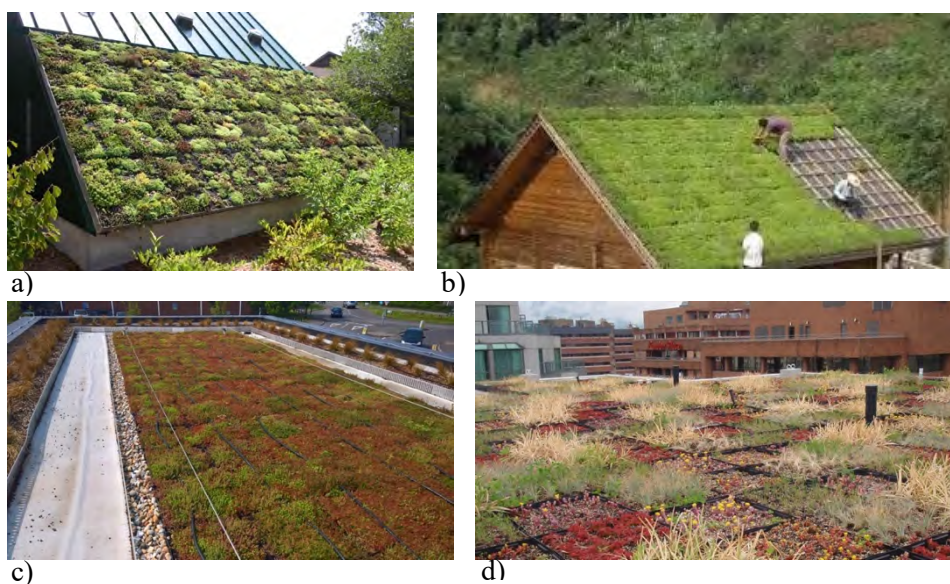


Figura 2.9 - Exemplos de aplicação do sistema modular de cobertura verde: a) e b) Aplicação em cobertura inclinada; c) e d) Aplicação em cobertura plana (Fonte: *Canadian Contractor, Greening Solutions, Wallbarn, Tounesol Siteworks*).

O sistema convencional de cobertura verde é o sistema mais tradicional e antigo, onde os componentes são montados individualmente na superfície da cobertura, como mostra a figura 2.10.

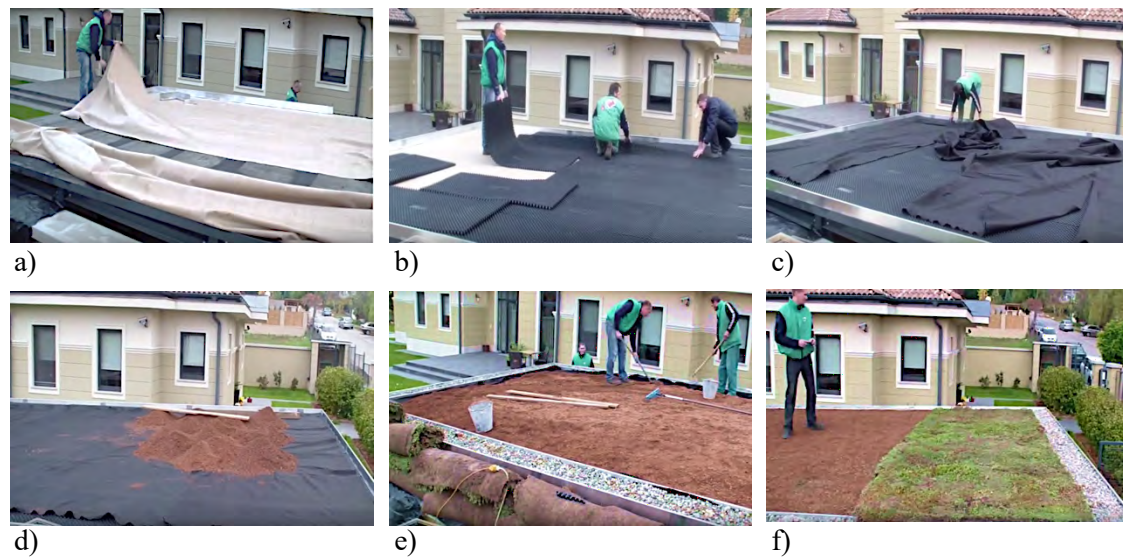


Figura 2.10 - Exemplo de instalação de uma cobertura verde convencional: a) Camada de proteção; b) Camada drenante; c) Filtro; d) e e) Aplicação do substrato; f) Aplicação do tapete vegetal (Fonte: *ArchiGreen*).

2.5. Benefícios das coberturas verdes

A utilização das coberturas verdes apresenta vários benefícios a nível ambiental, social e económico. Segundo Dunnet e Kingsbury (2018), para se obter algumas destas vantagens, as coberturas verdes terão que ser aplicadas em grande escala e, os seus benefícios serão visíveis à escala de bairro ou cidade. Na aplicação a nível urbano os benefícios passam pela redução dos efeitos de ilha de calor urbano (Gago et al, 2013; Santamouris, 2014; Berardi et al, 2014; Constanzo et al, 2015; Sun et al, 2016; Yang et al, 2018), pela gestão das águas pluviais (Simmons et al, 2008; Berndtsson, 2010; GhaffarianHoseini et al, 2015; Ercolani et al, 2018; Orsini et al, 2016), melhoria na acústica ambiental (VanRenterghem et al, 2013, 2015, 2017; Yang et al, 2012; Connelly e Hodgson, 2015), redução da poluição atmosférica (Yang et al, 2008), aumento da biodiversidade (Getter et al. 2009), entre muitos outros.

As aplicações em pequena escala, geram na maioria das vezes, benefícios somente à escala do edifício, como por exemplo, a poupança nos custos de energia, extensão da vida útil da cobertura, isolamento térmico e acústico e melhoria estética. Para além da sua aplicação em edifícios, estes sistemas podem também ser instalados em outros equipamentos urbanos, como mostra a figura 2.11.

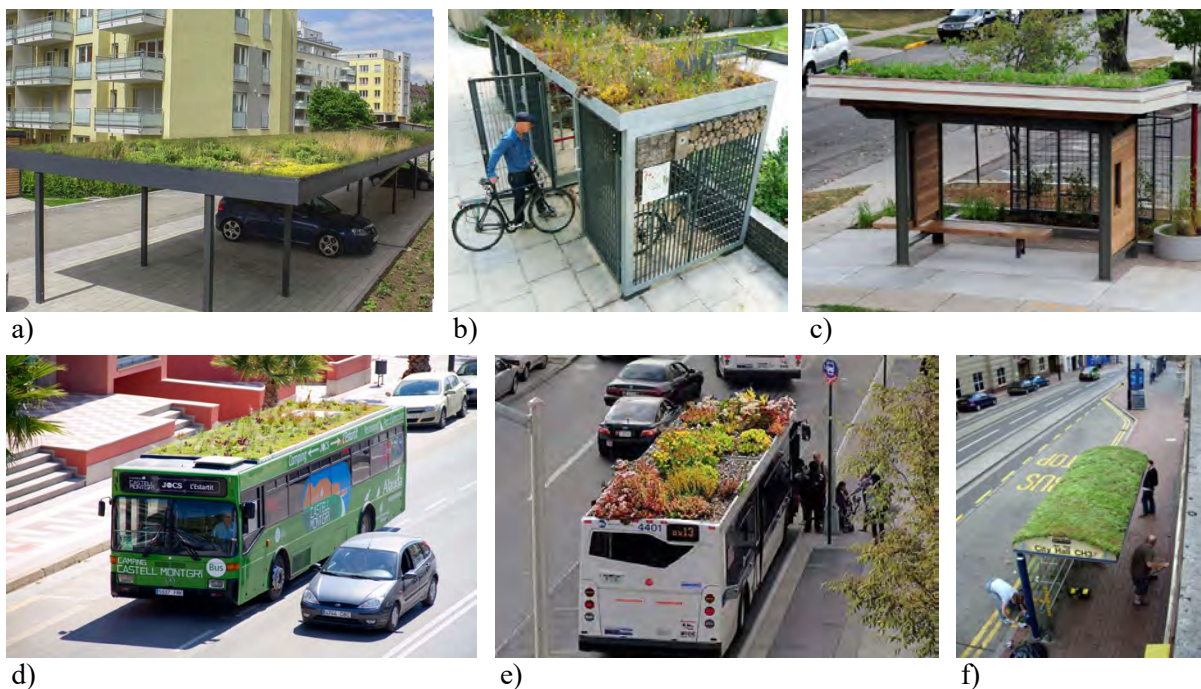


Figura 2.11 - Aplicação de coberturas verdes a nível urbano: a) Estacionamento público, Alemanha; b) Abrigo para bicicletas, Inglaterra; c) e f) Paragem de autocarro, EUA e Inglaterra; d) e e) Cobertura verde em veículos urbanos, Barcelona e Nova Iorque; (Fontes: Siebau, Green Roof Shelters, The Guardian, Urban Gardens Web).

De seguida serão apresentados alguns dos principais benefícios das coberturas verdes dando mais ênfase aos que se enquadram no âmbito deste trabalho.

Redução do efeito ilha de calor

O efeito ilha de calor revela-se na diferença de temperatura entre a cidade e os subúrbios, como mostra a figura 2.12. Deve-se ao impacto do ambiente construído, depende dos materiais de construção comuns usados nas zonas urbanas (betão, asfalto) terem diferentes propriedades térmicas e radiativas em relação à paisagem natural (estes materiais absorvem a energia radiativa e convertem em calor sensível), diminuição das áreas verdes, alta densidade de construções, diminuição da velocidade do vento devido ao aumento da rugosidade urbana, aumento de emissão de gases, uso do ar condicionado e poluição atmosférica. Além destes fatores, também é considerado para o aumento da temperatura urbana, o calor gerado pelos veículos e indústria.

A existência de áreas verdes nas zonas urbanas ajuda a reduzir as temperaturas do ambiente por meio do processo de evapotranspiração da vegetação e pelo efeito sombra. A inclusão de coberturas verdes pode também ajudar na redução deste fenómeno, visto que, estas são introduzidas em algumas das superfícies mais quentes das áreas urbanas.

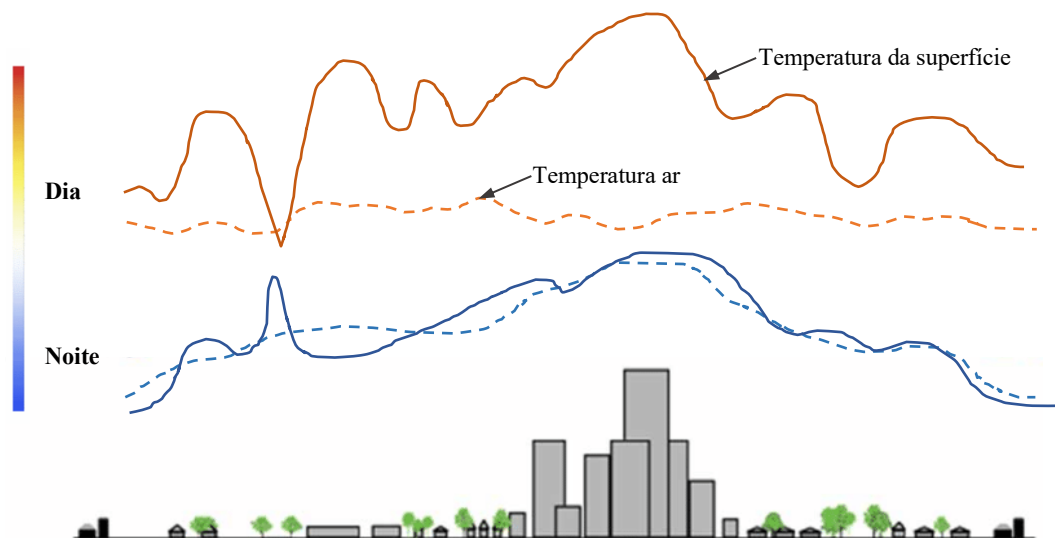


Figura 2.12 - Efeito ilha de calor urbano (Adaptado: NASA, 2010).

De acordo com Castleton et al (2010), no verão a área de uma cobertura, com membrana asfáltica, exposta à radiação solar pode atingir os 80°C, em contrapartida, com a instalação de uma cobertura verde, na mesma área de superfície, a temperatura reduz para 27°C. Apesar de ser notório o benefício deste tipo de cobertura na diminuição do efeito de ilha de calor, esta diminuição só terá efeitos significativos à escala urbana se forem instaladas coberturas verdes em quantidade ou, em conjunto com a estrutura verde urbana, como parques verdes e jardins.

Gestão das águas pluviais

Com o aumento das superfícies impermeáveis nas áreas urbanas, aumenta também o escoamento superficial das águas da chuva, causando consequências graves para os sistemas de escoamento público, que são sobrecarregados com caudais elevados de água e que, por sua vez, são descarregados nos lagos e rios. Para além de aumentar o risco de cheias e erosão, estas águas contêm uma percentagem elevada de poluentes, que ameaçam a biodiversidade e podem contaminar os reservatórios de água potável (Simmons et al. 2008).

Um dos grandes benefícios das coberturas verdes é a sua habilidade em reduzir e controlar o caudal das águas pluviais escoadas, e também filtrar (e absorver) os poluentes que vêm com a água das chuvas (aumentando a qualidade da água permitindo a sua captação e reutilização), diminuindo o risco de cheias e entupimentos dos sistemas de drenagem, como mostra a figura 2.13.



Figura 2.13 - Problemas causados por eventos de precipitação intensa (Fonte: *New Security Beat*, *Huffington Post*, *UrbanSpace*).

O sistema de coberturas verdes apresenta uma capacidade de absorção e armazenamento de água significativa, devido à presença do substrato e da vegetação, o que faz com que se verifique um atraso no tempo de escoamento inicial. Segundo vários autores, a capacidade de absorção e armazenamento vai depender da profundidade do substrato, do tipo de vegetação e da intensidade e duração da precipitação. A água em excesso é, posteriormente, evaporada para a atmosfera, utilizada pelas plantas no processo de transpiração ou é lentamente drenada pelo sistema, como mostra o esquema da figura 2.14.

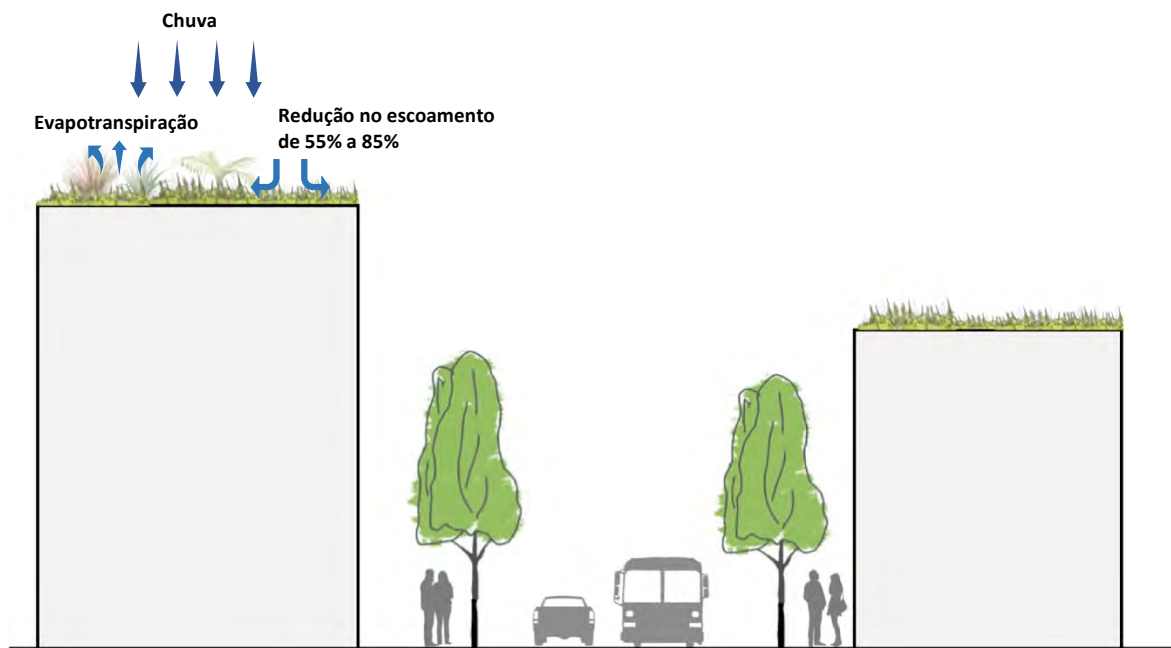


Figura 2.14 - Cobertura verde na gestão das águas pluviais.

Acústica ambiental

Nas áreas urbanas, as envolturas dos edifícios são, tipicamente, superfícies rígidas, geralmente refletoras, o que aumenta o nível de pressão sonora. O sistema de cobertura verde, ao ser colocado sobre materiais convencionais de cobertura, altera o trajeto das ondas sonoras e parte da sua energia é dissipada pela vegetação e substrato (Conelly e Hodgson, 2015).

Em ruas cercadas com edifícios ou em pátios, a quantidade de energia sonora que se propaga sobre as coberturas, é determinada pela altura, largura e forma dos edifícios e também pela inclinação das coberturas (figura 2.15). Uma cobertura verde inclinada mostra-se mais eficiente na absorção das ondas sonoras em relação às coberturas verdes planas, principalmente no ruído ao nível da rua. A cobertura verde inclinada, oferece uma área maior de absorção das ondas sonoras (Van Renterghem, 2017). As coberturas verdes planas atuam como superfícies absorventes especialmente para ondas sonoras difratadas entre ruas paralelas (Yang et al, 2012).

As camadas das coberturas verdes, ajudam a reduzir o impacto das ondas sonoras, mas, deve-se ter em conta que este tipo de sistema apresenta um comportamento dinâmico e, as suas propriedades mudam com o tempo devido à presença de água, comportamento e crescimento das plantas e compactação e profundidade do solo (Van Renterghem, 2017).

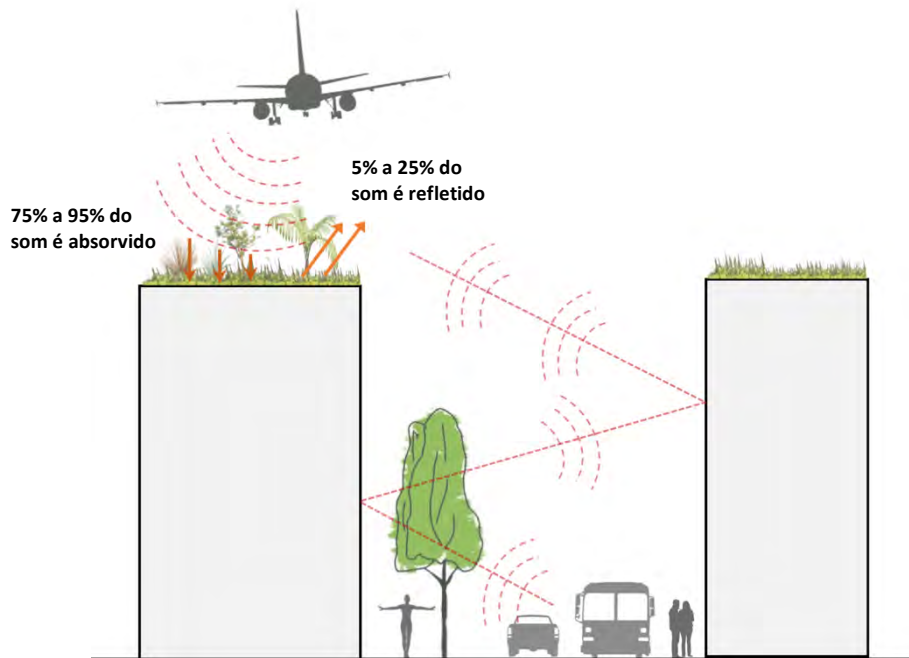


Figura 2.15 - Contribuição acústica das coberturas verdes nas áreas urbanas.

Desempenho energético

As coberturas verdes têm sido alvo de vários estudos sobre o seu desempenho térmico nomeadamente na redução das necessidades de arrefecimento e aquecimento. No entanto, para o bom desempenho térmico desta solução deve ser associada à eficiência dos sistemas de ventilação e climatização. Basicamente, o contributo das coberturas verdes, para a melhoria no desempenho energético, é devido ao “efeito sombra” sobre a cobertura do edifício, o que faz com que a radiação solar que atravessa o sistema seja limitada. Por outro lado, oferece isolamento térmico adicional e o teor em água do substrato contribui para o aumento da inércia

térmica da cobertura. Mais uma vez, o tipo de vegetação, o tipo e altura do substrato, são importantes para se alcançar a poupança máxima de energia. Contudo, segundo alguns autores, existem ainda alguns resultados controversos sobre este tema e sugerem a realização de mais pesquisas com mais foco no impacto sazonal das coberturas verdes no desempenho energético (Vijayaraghavan, 2016).

Redução da poluição atmosférica

A poluição urbana é gerada pelas atividades resultantes da ação humana, como por exemplo, a emissão de gases por veículos, queimadas, atividades industriais, processos de geração de energia, entre outras. Estas atividades afetam a qualidade do ar ambiente. As coberturas verdes, através das plantas, podem diminuir as partículas poluentes e os gases com efeito estufa, contribuindo para a renovação do ar. Indiretamente, ao contribuírem para a redução da temperatura nas zonas urbanas, contribuem também para a redução da produção de ozono na atmosfera, resultante dos sistemas de climatização.

Aumento da biodiversidade

O aumento das construções e o pouco investimento em áreas verdes causa efeitos negativos nos ecossistemas e no meio urbano. As coberturas verdes podem compensar a perda de áreas verdes e criam espaços que promovem a flora e a fauna, usando o ambiente urbano. Em áreas urbanas, o potencial para a biodiversidade, deste tipo de solução construtiva, pode ser afetado pelo tipo de vegetação e sua altura, tipo de substrato e profundidade, área da superfície onde está instalada, clima local e altura do edifício onde está aplicada.

3. Campanha experimental

Apesar de se conhecerem os benefícios das coberturas verdes, nomeadamente na gestão das águas pluviais, melhoria do desempenho energético e redução da poluição sonora, este tipo de soluções necessita de ser caracterizado. Esta caracterização é importante para se obterem parâmetros que possam ser úteis na avaliação do benefício de coberturas verdes à escala urbana. Desta forma, no âmbito deste trabalho, foi preparada uma campanha experimental no laboratório do Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade (Itecons), com o objetivo de quantificar a absorção sonora, a capacidade de drenagem e retenção de água e ainda a quantificação das temperaturas e dos fluxos de calor de um sistema modular de cobertura verde.

Na campanha experimental dedicada ao comportamento térmico, foram quantificadas as temperaturas e os fluxos de calor na cobertura verde em estudo, em câmara bioclimática, tendo em conta as propriedades de cada camada em especial do substrato e da vegetação. O estudo do comportamento térmico foi realizado em câmara bioclimática para as situações de inverno e verão, em regime permanente e variável, com e sem a ocorrência de chuva. Neste estudo não foi considerado o efeito da radiação solar nem do vento por não ser possível simulá-los em câmara bioclimática. A câmara bioclimática possui lâmpadas de iodetos metálicos com refletores (315W) as quais fornecem luz que favorecem a fotossíntese das plantas.

A campanha experimental, para o estudo do comportamento hídrico do sistema modular de cobertura verde, contempla duas partes: na primeira foi determinada a capacidade de drenagem e retenção do sistema modular proposto, enquanto que na segunda parte foi avaliada a evolução do teor em água do sistema e componentes. Para a avaliação da capacidade de retenção e drenagem, foi realizada uma campanha experimental, em condições laboratoriais controladas, onde o tabuleiro foi submetido a três descargas de água com intervalos de 24 horas entre elas.

Para a avaliação do teor em água foi realizada uma campanha experimental no exterior, que teve como objetivo verificar o efeito das condições meteorológicas no sistema (em particular temperatura e radiação solar), para várias condições atmosféricas (dia de sol, céu nublado, etc.) e ainda avaliar o efeito de sombra. Este último caso é útil nos casos de instalações em que haja obstáculos à radiação solar, como por exemplo, em coberturas com painéis solares, etc. Este parâmetro é importante pela influência que o teor em água pode ter na capacidade de drenagem

e retenção, mas também na absorção sonora e nas temperaturas superficiais, que serão monitorizados no trabalho de avaliação experimental.

Com o objetivo de avaliar o comportamento acústico, foi determinado o coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante. Este ensaio permitiu avaliar o coeficiente de absorção sonora em várias frequências. A definição do espectro de frequências foi baseada na gama de frequências apresentada na norma de ensaio. Foi ainda avaliado o efeito do teor em água do sistema na absorção sonora.

Apresenta-se de seguida o sistema estudado e posteriormente as campanhas de ensaio realizadas.

3.1. Sistema modular de cobertura verde

Após um levantamento sumário das soluções existentes no mercado, na primeira fase do trabalho experimental desta dissertação, selecionou-se o sistema modular mais adequado. Teve-se em conta o facto de se querer uma cobertura verde do tipo extensiva, a dimensão e flexibilidade do tabuleiro, o modo de encaixe e a altura do substrato. A solução selecionada tem como componentes os apresentados na figura 3.1:

- Tabuleiro de polipropileno reciclado com dimensões 500 mm x 500 mm x 100 mm (M-Tray®)



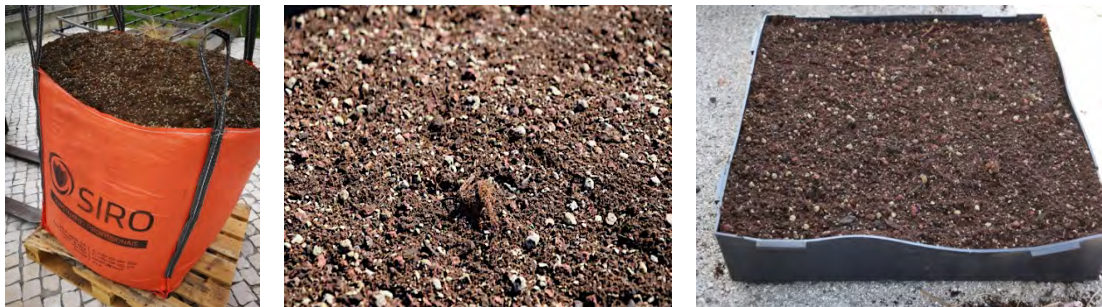
- Agregado leve de argila expandida (Leca® Dur)



- Filtro (geotêxtil)



- Camada de substrato



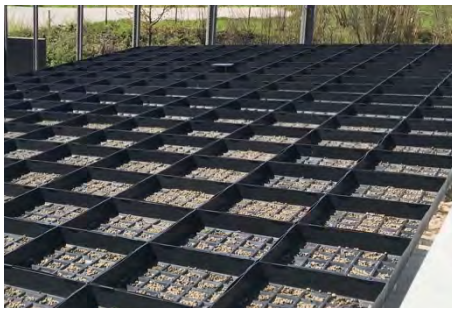
- Tapete verde de *Sedum*, Herbáceas e Gramíneas



Figura 3.1 - Componentes do sistema de cobertura verde (Fonte: Autor, Wallbarn, Zinco).

A vegetação é uma componente importante na composição das coberturas verdes. A escolha das plantas depende do tipo de cobertura verde (extensiva, intensiva, semi-intensiva), tipo de substrato, clima, exposição solar, necessidade de rega, crescimento das raízes, custos e tipo de manutenção, aspeto visual, etc.

Neste estudo trata-se de uma cobertura verde extensiva, como se pode ver na figura 3.2, e devido à pouca profundidade do substrato permitida neste sistema e à baixa manutenção requerida, são sugeridas plantas adaptadas ao clima local, com crescimento rasteiro e raízes pouco profundas, que não necessitem de muita rega e sejam de fácil manutenção (e.g. poda, controle de pragas e doenças).



a)



b)



c)



d)

Figura 3.2 - Composição do sistema modular de cobertura verde: a) Montagem dos tabuleiros; b) Sistema de encaixe entre tabuleiros; c) Tabuleiros com o substrato e o tapete vegetal com vegetação do tipo *sedum*; d) Tabuleiro completo com vegetação do tipo *sedum*, herbáceas e gramíneas.

3.2. Comportamento térmico

As coberturas verdes têm um papel importante na mitigação do efeito ilha de calor urbano. Como já referido no estado da arte, a instalação de coberturas verdes é uma das estratégias para mitigar esse efeito, devido ao arrefecimento por evapotranspiração e, também pelo sombreamento proporcionado pelas plantas que reduz a quantidade de radiação solar incidente no substrato. Deste modo, o sistema de coberturas verdes ajuda a reduzir as temperaturas do ar próximo da superfície.

Com o objetivo de quantificar as temperaturas e os fluxos de calor no sistema modular de cobertura verde, foi organizada uma campanha experimental tendo em conta as propriedades de cada camada, em especial do substrato e da vegetação. Nesta campanha foram analisados em câmara bioclimática (figura 3.3) dois tipos de cobertura verde: o sistema modular e um sistema de cobertura verde convencional para servir de referência. Sendo assim, foram preparados sobre uma laje de betão os dois tipos de cobertura verde, isoladas com placas de poliestireno extrudido (XPS) a qual foi instalada na câmara bioclimática.

A câmara bioclimática é composta por duas câmaras sobrepostas, permitindo simular dois ambientes distintos: a câmara superior simula o ambiente exterior, enquanto o ambiente interior é simulado na câmara inferior. As duas câmaras comunicam através de uma abertura de aproximadamente 3.70 m² onde é colocado o provete. A estrutura da caixa é integralmente executada em painéis do tipo *sandwich* com espuma de poliuretano injetada e acabamento em aço galvanizado.

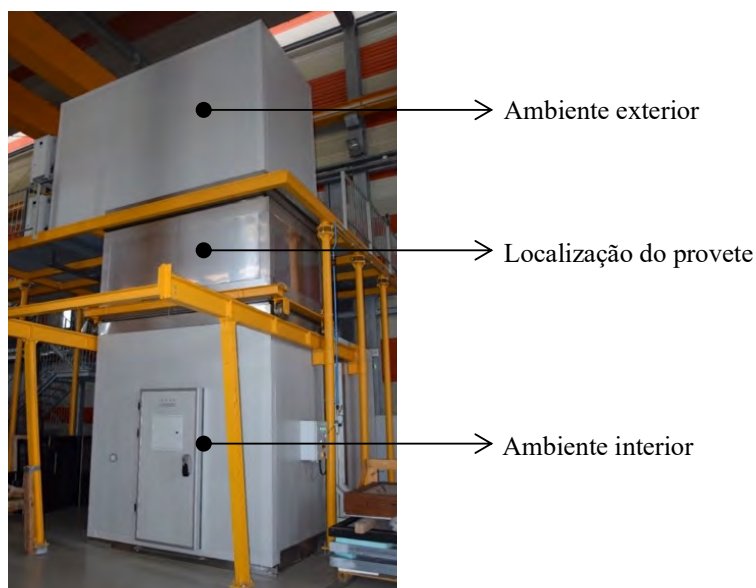


Figura 3.3 - Câmara bioclimática.

Para a obtenção das temperaturas e fluxos de calor recorreu-se a termopares e fluxímetros, respetivamente. As medições em câmara bioclimática vão permitir avaliar o sistema em dois regimes de temperaturas, permanente e variável, e em situação de inverno e verão, com e sem chuva.

3.2.1. Montagem e descrição do provete de ensaio

Nesta campanha foram utilizados 6 tabuleiros com a composição modular descrita no ponto 3.1, e um sistema convencional, constituído por manta geotêxtil, camada drenante, filtro geotêxtil, substrato e tapete verde de *sedum* e gramíneas em camadas contínuas. Após a montagem do provete, a laje foi transportada e instalada na câmara bioclimática. Na figura 3.4 é apresentado o registo fotográfico do processo de montagem dos dois tipos de cobertura verde.

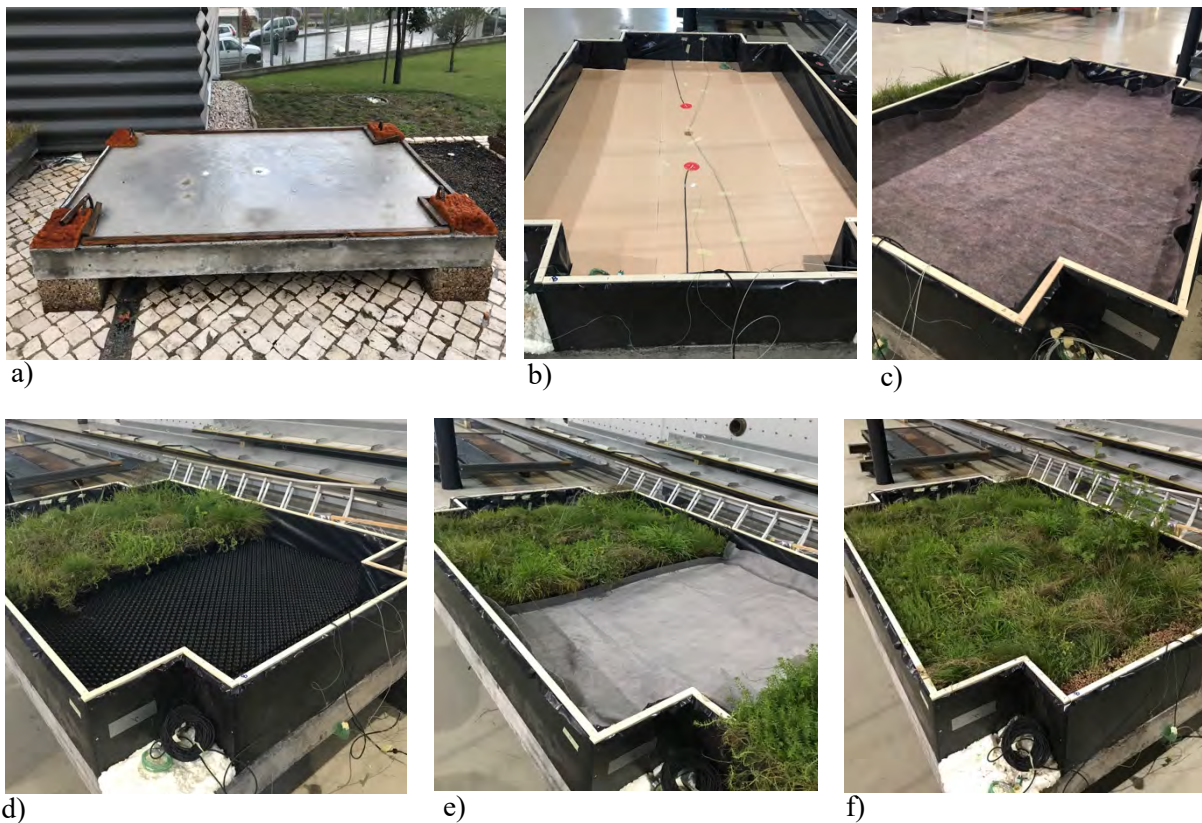


Figura 3.4 - Montagem do provete de ensaio: a) Base em laje de betão; b) Colocação do XPS; c) Colocação da manta geotêxtil; d) Colocação dos tabuleiros e da camada drenante na solução convencional; e) Colocação do filtro geotêxtil na solução convencional; f) Provete completo com os dois sistemas.

A figura 3.5 esquematiza o posicionamento das duas soluções de cobertura verde, e como foram identificadas durante o ensaio, onde a zona A corresponde ao sistema modular e a zona B à cobertura convencional.

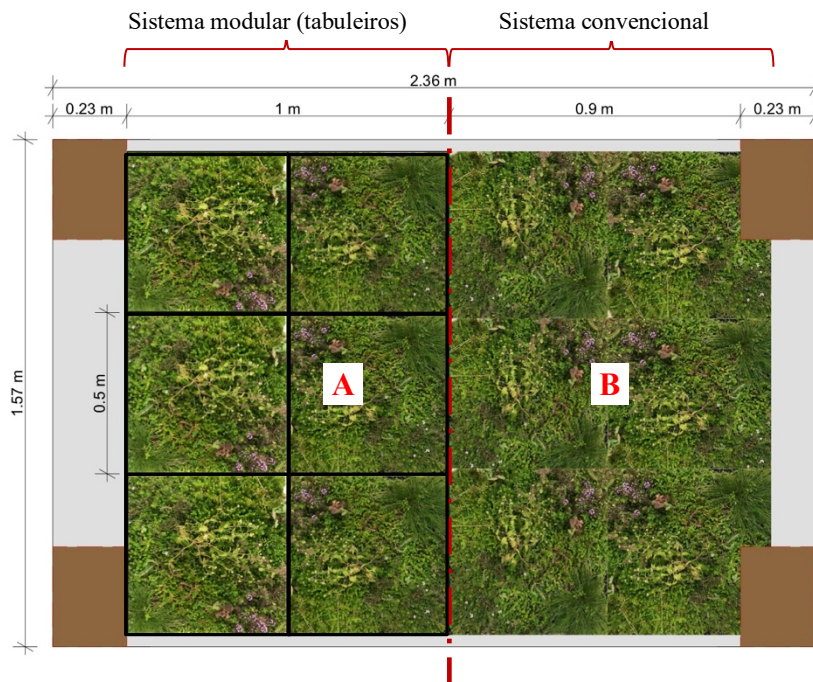


Figura 3.5 -Representação do esquema de montagem das coberturas verdes com a identificação de cada sistema. A (sistema modular) e B (sistema convencional).

Para a medição das temperaturas superficiais no interior do sistema, foram colocadas nas diferentes camadas do sistema sondas de temperatura do tipo K (figura 3.6). Para este ensaio, foram utilizadas 6 sondas tipo K – A1 a A6 - no lado A e 7 sondas tipo K – B1 a B7 no lado B.

A medição das temperaturas do ambiente exterior foi obtida através de sondas de temperatura do tipo PT100 (figura 3.6), colocadas na superfície exterior de cada solução de cobertura verde, apoiadas numa estrutura de madeira em forma de cavalete (figura 3.7), e colocadas verticalmente em quatro níveis diferentes – A8 a A11 (zona A) e B8 a B11 (zona B).

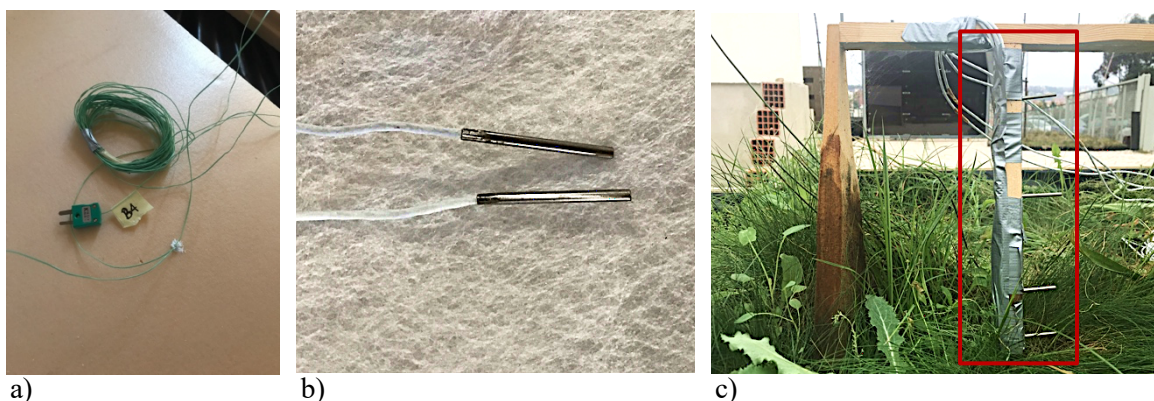


Figura 3.6 - Sensores utilizados no ensaio. a) Sensor do tipo K; b) Sensor tipo PT100; c) Alinhamento dos sensores tipo PT100.



Figura 3.7- Colocação do cavalete com sondas PT100.

Estes aparelhos foram conectados a um *data logger* para a aquisição dos dados para posteriormente serem descarregados para um computador portátil.

Para a medição do fluxo de calor, que pode ser definido como a taxa de transferência de calor através de um determinado material por unidade de área, foram utilizados dois fluxímetros Hukseflux HFP01. Estes aparelhos foram utilizados na superfície da laje em contato com o ambiente interior (TF1_A e TF1_B) e, na superfície do XPS sob as coberturas verdes interior (TF2_A e TF2_B), como se apresenta nas figuras 3.8 e 3.9.

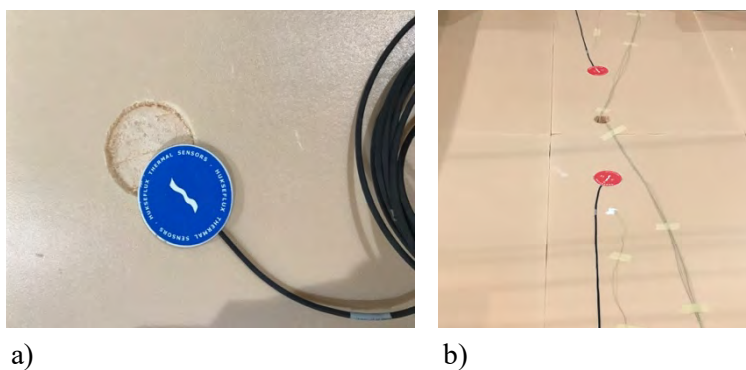


Figura 3.8 - Sensores: a) Fluxímetro Hukseflux HFP01; b) Fluxímetro colocados na superfície do XPS.

Na figura 24 está representado o posicionamento dos sensores, bem como a indicação dos locais de medição, e estão distribuídos da seguinte maneira:

A Cobertura modular	Designação	B Cobertura convencional	Designação
A1	Temperatura ambiente interior	B1	Temperatura ambiente interior
A2	Temperatura na superfície inferior da laje	B2	Temperatura na superfície inferior da laje
A3	Temperatura na superfície superior da laje	B3	Temperatura na superfície superior da laje
A4	Temperatura superficial do XPS	B4	Temperatura superficial do XPS
A5	Temperatura no interior do substrato	B5	Temperatura no interior do substrato
A6	Temperatura superficial do substrato	B6	Temperatura superficial do substrato
		B7	Temperatura na base do substrato
A8	Temperatura exterior a 5cm do substrato	B8	Temperatura exterior a 5cm do substrato
A9	Temperatura exterior a 10cm do substrato	B9	Temperatura exterior a 10cm do substrato
A10	Temperatura exterior a 20cm do substrato	B10	Temperatura exterior a 20cm do substrato
A11	Temperatura exterior a 30cm do substrato	B11	Temperatura exterior a 30cm do substrato
TF1_A	Fluxo de calor na superfície inferior da laje	TF1_B	Fluxo de calor na superfície inferior da laje
TF2_A	Fluxo de calor na superfície do XPS	TF2_B	Fluxo de calor na superfície do XPS

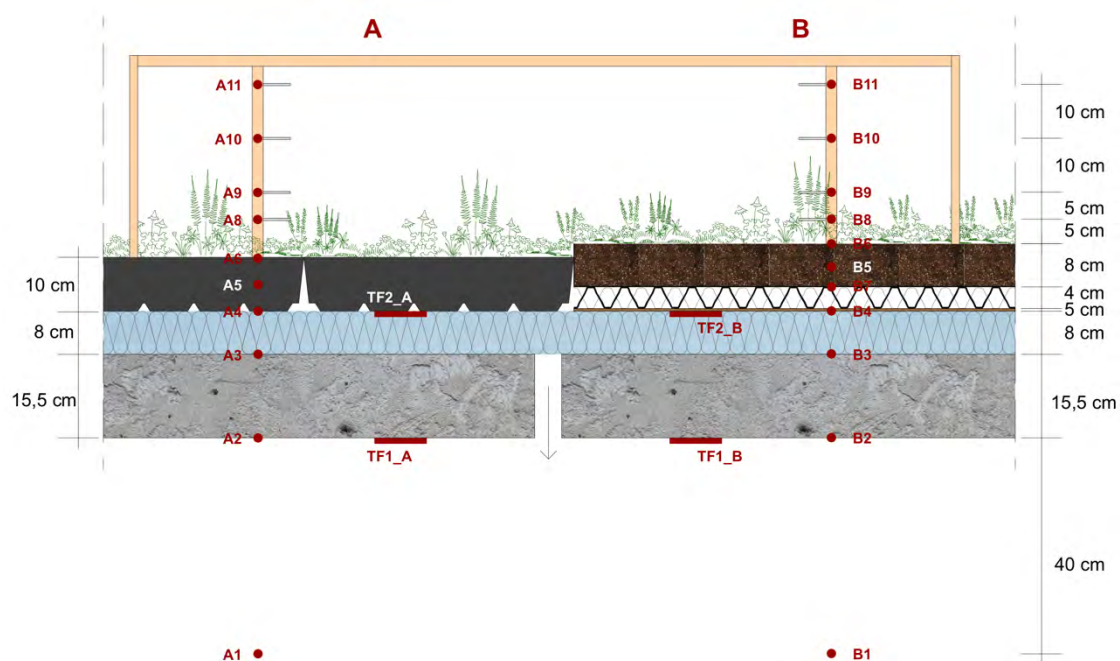


Figura 3.9 - Localização e alinhamento dos sensores.

Após a montagem da cobertura e dos equipamentos de medição, a laje foi transportada e instalada na câmara bioclimática. Sendo um dos objetivos avaliar o efeito da precipitação nos tabuleiros, instalou-se um sistema de rega constituído por 20 *sprinklers*, para simular situações de chuva, como se apresenta na figura 3.10.



Figura 3.10 - Sistema de rega instalado na câmara bioclimática.

3.2.2. Procedimento de ensaio

Para avaliar o comportamento térmico da cobertura verde, em câmara bioclimática, foram medidas as temperaturas ambiente (exterior e interior) e em vários pontos do sistema e o fluxo de calor. Nesta campanha, a câmara inferior foi utilizada para simular o ambiente interior, onde foi programada uma temperatura de 20 °C tanto para a estação de aquecimento como a de arrefecimento. A câmara superior, utilizada para simular o ambiente exterior, foi programada de modo a simular ciclos de inverno e verão.

As temperaturas e os fluxos foram monitorizados ao longo de 4 dias, para o regime permanente e 7 dias para o regime variável, para as duas situações (inverno e verão). As medições foram realizadas em intervalos de 1 minuto e 10 minutos para as temperaturas e fluxos de calor, respetivamente. Devido à grande quantidade de dados obtidos, optou-se por apresentar os gráficos para um período de 72 horas.

Num primeiro ensaio, fez-se uma análise do comportamento térmico das coberturas verdes, numa situação de inverno, no regime permanente e variável com e sem chuva, com se apresenta na figura 3.11. As coberturas verdes foram submetidas a uma temperatura exterior constante de 5°C (regime permanente) e entre os 0°C e 15°C (regime variável). A temperatura do ambiente interior foi programada para os 20°C.

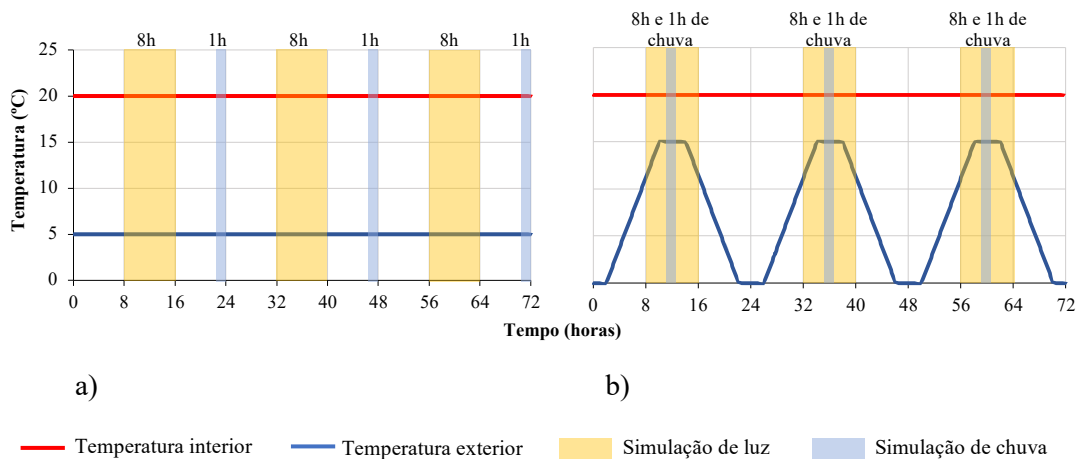


Figura 3.11 - Condições impostas na câmara bioclimática, para simular a situação de inverno; a) regime permanente; b) regime variável.

Num segundo ensaio, com o mesmo objetivo, foi analisado o comportamento térmico, numa situação de verão, nos regimes permanente e variável com e sem chuva, como está apresentado na figura 3.12. As coberturas verdes foram submetidas a uma temperatura exterior constante de 30°C, para o regime permanente, e temperaturas exteriores entre os 10°C e 35°C, para o regime variável. A temperatura do ambiente interior permaneceu nos 20°C.

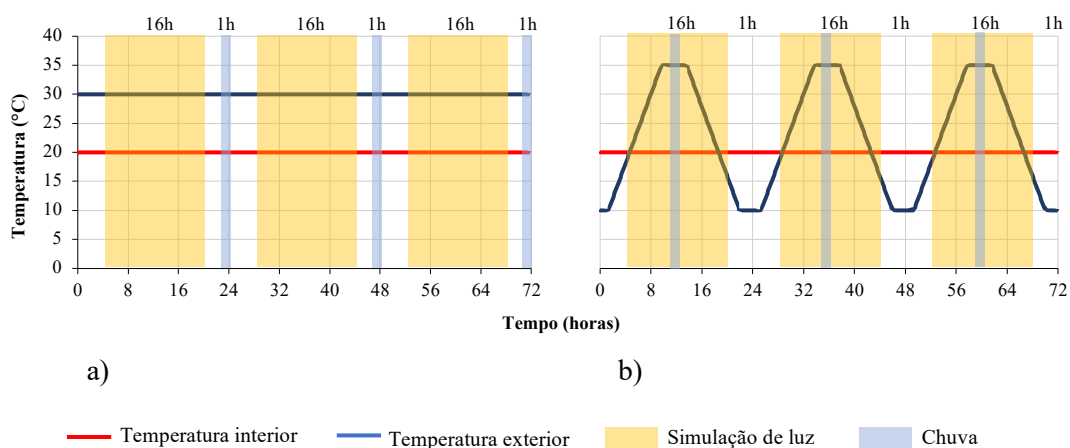


Figura 3.12 – Condições impostas na câmara bioclimática, para simular a situação de verão; a) regime permanente; b) regime variável.

3.2.3. Resultados

No presente subcapítulo são apresentados os resultados obtidos ao longo da campanha experimental, através de gráficos para posterior análise e discussão, estando divididos em duas partes, situação de inverno (3.2.3.1) e situação de verão (3.2.3.2).

Nos dois pontos 3.2.3.1 e 3.5.3.2, apresenta-se uma análise gráfica dos resultados obtidos, em câmara bioclimática, das temperaturas e do fluxo de calor das duas soluções, em regime permanente e variável com e sem chuva. Por último, efetuou-se uma comparação entre os resultados obtidos para as duas situações, inverno e verão, para cada solução de cobertura verde.

3.2.3.1. Situação de inverno

Regime permanente

Nos gráficos 3.13 e 3.14 apresentam-se os resultados obtidos para o regime permanente seco, para as temperaturas do ambiente exterior e nas diferentes camadas dos dois sistemas, num período de 72 horas. Pela análise dos gráficos observou-se que:

- Nas duas soluções de cobertura verde, a diferença da temperatura entre a superfície exterior da laje (A3 e B3) e a superfície do XPS (A4 e B4) é significativa, o que comprova a resistência térmica do XPS (A4 e B4);
- As temperaturas do ambiente exterior (sensores A8 a A11 e B8 a B11) são semelhantes, o que revela uma uniformização das condições ambientais;
- Não se verificou estratificação das temperaturas no ambiente, ou seja, não há grande diferença entre as temperaturas dos sensores A8 e A11 ou B8 e B11;
- Ambos os sistemas mantiveram as temperaturas do ambiente estáveis e mais próximas da temperatura ambiente programada (20 °C);
- Tendo por base a diferença de temperaturas entre a superfície do substrato (A6 e B6) e o ambiente exterior (cerca de 3 °C), conclui-se que a vegetação oferece uma resistência térmica apreciável;
- Comparando-se a diferença indicada no ponto acima com a diferença de temperatura entre o ambiente interior, A1 e B1, e a superfície inferior da laje, A2 e B2, cerca de 1 °C, realça-se ainda mais a já referida resistência térmica;
- Perante o gradiente de temperatura entre a superfície superior da laje de betão (A3 e B3) e o ambiente exterior (cerca de 15 °C), verifica-se que o sistema de cobertura verde confere uma elevada proteção térmica. Embora se verifique uma maior diferença de temperaturas na zona B, a proteção térmica nos dois sistemas é semelhante;

- Relativamente à evolução de temperaturas nas 72 horas, confirmou-se estarmos em presença de um regime permanente em que as pequenas oscilações estão associadas ao efeito da luz; atesta-se a constância deste regime nas medições de fluxo apresentadas na figura 3.15.

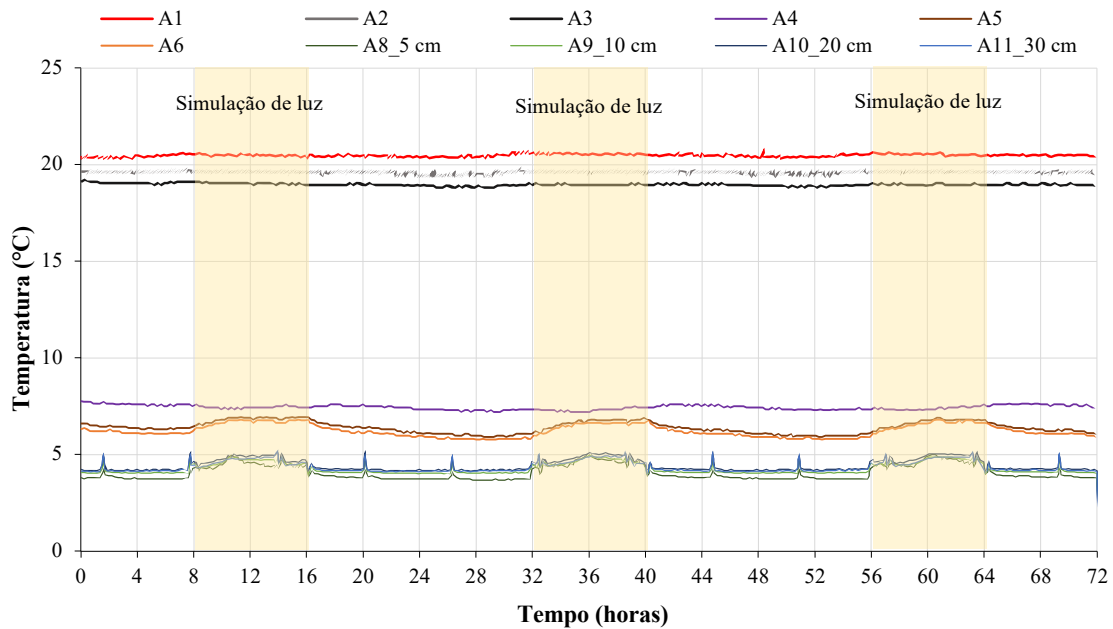


Figura 3.13 - Temperaturas medidas na zona A (cobertura verde modular), ao longo de 72 horas (inverno - regime permanente seco).

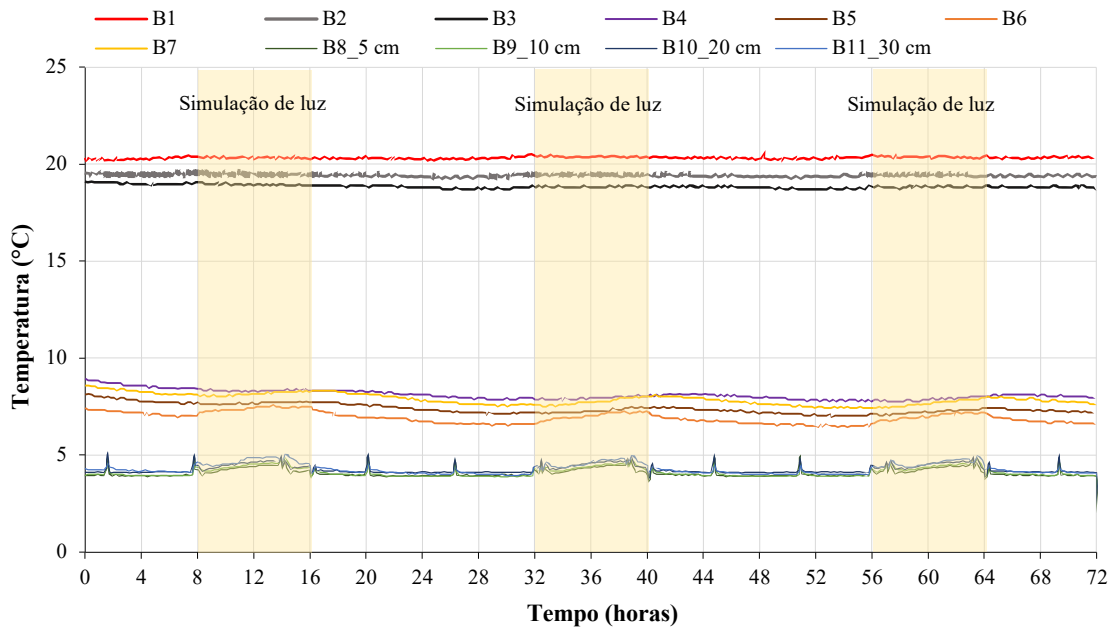


Figura 3.14 - Temperaturas medidas na zona B (cobertura verde convencional) ao longo de 72 horas (inverno - regime permanente seco).

No gráfico da figura 3.15 apresentam-se os resultados dos fluxos de calor obtidos nas duas soluções de cobertura verde, ao longo de 72 horas. Os fluxos de calor TF1_A e TF2_A

correspondem à zona A (sistema modular) e o TF2_B e TF2_B pertencem à zona B (sistema convencional). Observando os resultados, verificou-se que:

- Por se tratar do regime permanente seco observou-se que o fluxo de calor é praticamente constante na superfície do XPS (TF2_A e TF2_B), sendo visível uma pequena variação no fluxo no período com simulação de luz, em particular na superfície do XPS (TF2_A) do sistema modular;
- Os fluxos de calor, TF1_A e TF2_A (ou TF1_B e TF2_B) não são iguais. Como se está em regime permanente, os fluxos deviam ser mais próximos, o que nos permite concluir que as condições de fixação dos fluxímetros à superfície inferior da laje não foram as ideais. Perante isso, optou-se por não se apresentar os fluxos de calor relativos aos TF1_A e TF1_B;
- O fluxo de calor na zona de sistema contínuo (B) é inferior ao da zona com sistema modular (A), sendo a diferença cerca de 1.16 W/m^2 ;
- Com base nos fluxos de calor medidos na camada de XPS (TF2_A e TF2_B) e nas diferenças de temperaturas entre ambientes obtêm-se coeficientes de transmissão térmica que rondam os $0.37 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$, na zona A, e os $0.35 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$, na zona B.

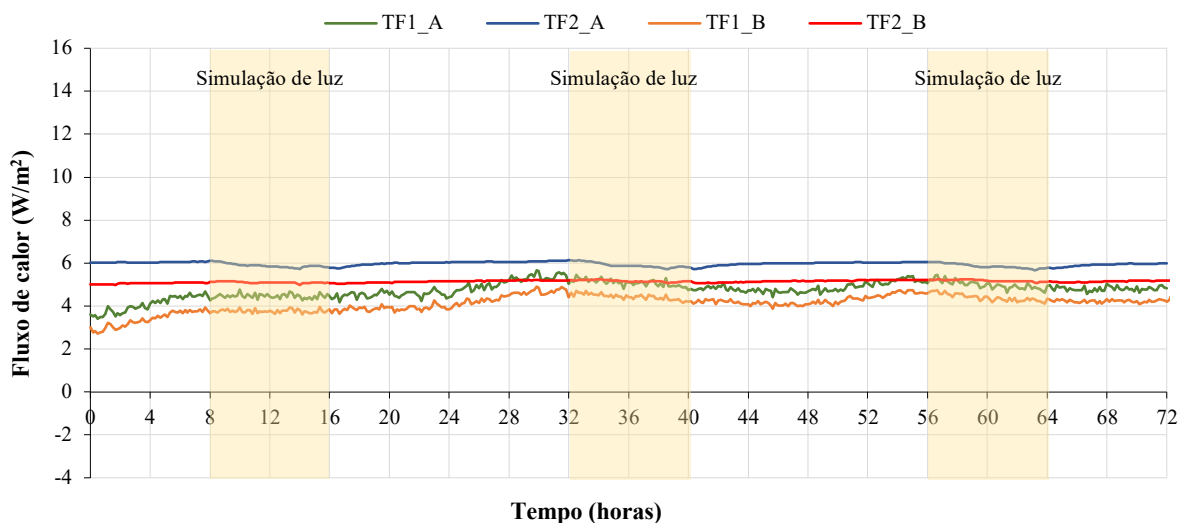


Figura 3.15 - Fluxos de calor medidos na superfície inferior da laje (TF1_A e TF1_B) e sobre o XPS (TF2_A e TF2_B), nas duas soluções de cobertura verde (inverno - regime permanente seco).

Mantendo-se as mesmas condições de fronteira (temperaturas nos ambientes exterior e interior), mas introduzindo a simulação da chuva, observou-se que a resposta dos dois sistemas de cobertura verde é variável. Apresenta-se, nos gráficos 3.16 e 3.17, as temperaturas registadas no sistema, sendo que:

- Se verificou um aumento das temperaturas medidas no ambiente exterior (A8 a A11 e B8 a B11) no período da chuva; isto deve-se ao facto da temperatura da água estar acima dos

12 °C. A temperatura na superfície do substrato (A6 e B6) também aumentou, o que confirma a influência da temperatura da água;

- Se observou uma aproximação das temperaturas da superfície superior da laje (A3) e do substrato (A6), associadas à temperatura da água, o que levou a uma variação nos fluxos de calor;
- Se registou uma maior estratificação das temperaturas do ambiente em relação ao permanente seco;
- Se continua a verificar uma resistência térmica significativa na superfície exterior devido à presença da vegetação, à semelhança do que se verificou no permanente seco;
- Se registaram, com a chuva, variações de temperatura significativas abaixo do isolamento, ampliando-se a diferença de temperatura em relação ao interior;
- Após o período de precipitação, os sistemas recuperam, em praticamente 24 horas, a mesma distribuição de temperaturas verificada no regime permanente.

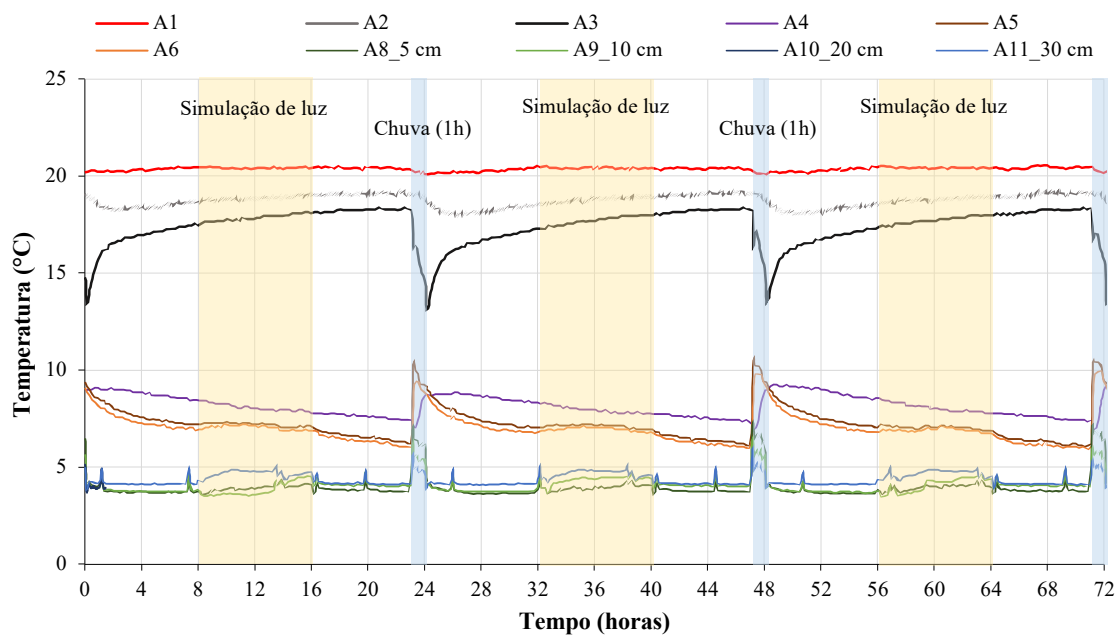


Figura 3.16 - Temperaturas medidas na zona A (cobertura verde modular) ao longo de 72 horas (inverno - com chuva).

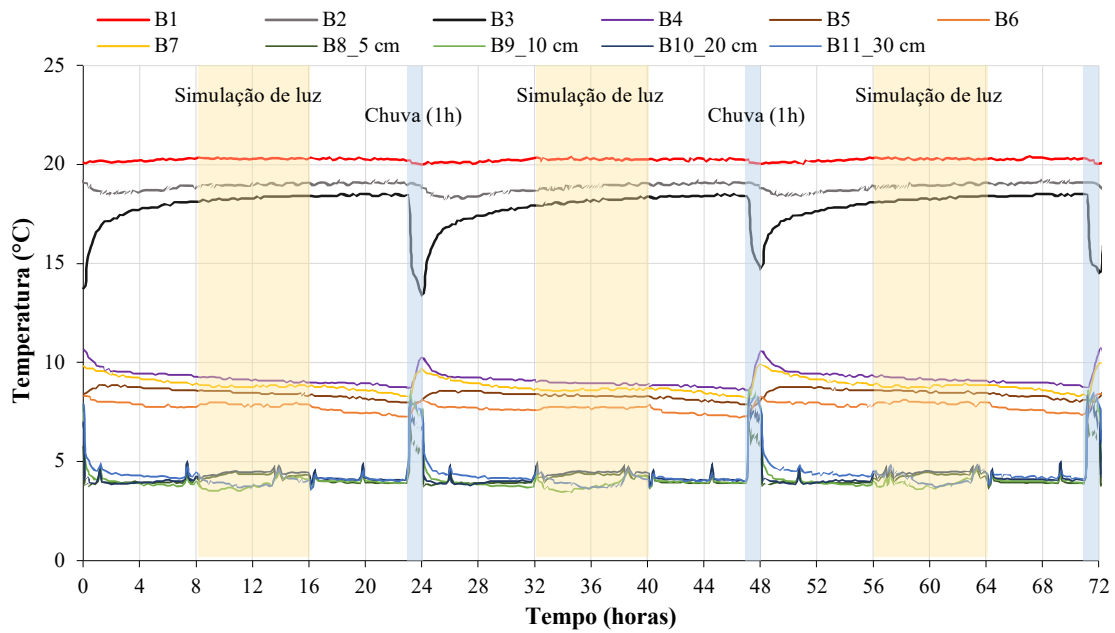


Figura 3.17 - Temperaturas medidas na zona B (cobertura verde convencional) ao longo de 72 horas (inverno - com chuva).

No gráfico da figura 3.18 estão apresentados os resultados obtidos para os fluxos de calor na superfície do XPS (TF2_A e TF2_B), das duas soluções de cobertura verde. Pela análise do gráfico verificou-se que:

- Com a ocorrência de chuva houve uma variação nos fluxos de calor, devido à aproximação das temperaturas das superfícies exterior da laje e substrato; no entanto, registre-se que os fluxos tendem a estabilizar rapidamente, principalmente na zona B;

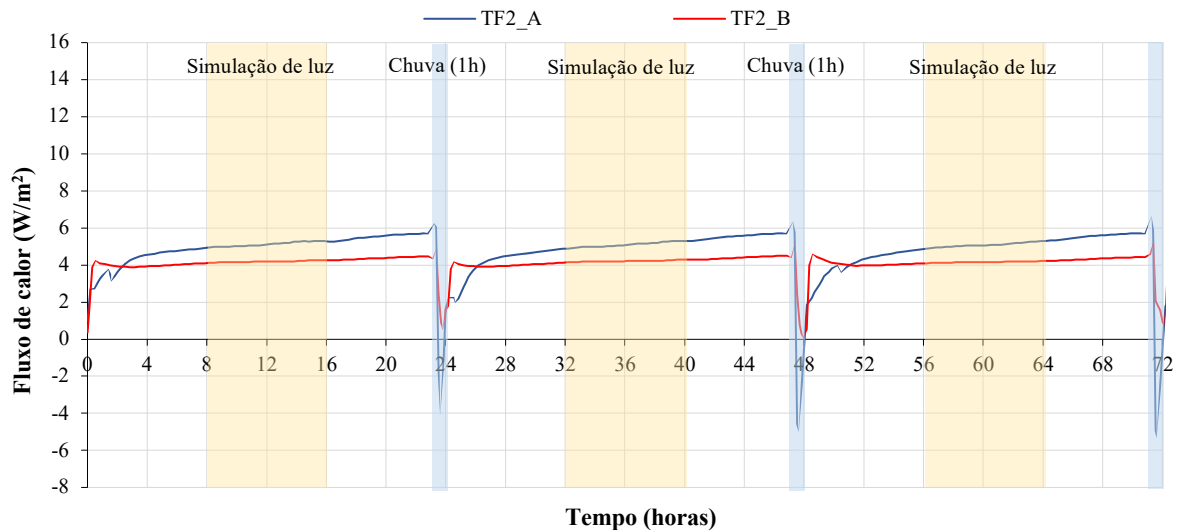


Figura 3.18 - Fluxos de calor medidos na superfície inferior da laje (TF1_A e TF2_A) e sobre o XPS (TF2_A e TF2_B), nas duas soluções de cobertura verde (inverno - com chuva).

- O sistema contínuo, zona B, apresenta um fluxo de calor menor e mais constante do que a zona A;
- Os fluxos diminuíram no período de chuva de vido ao aumento de temperatura no sistema, apesar do humedecimento do substrato e consequente aumento de condutibilidade térmica;
- Com base nos dados imediatamente antes da simulação da chuva estimam-se uns coeficientes de transmissão térmica que rondam os $0.35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, na zona A, e os $0.28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, na zona B.

Regime variável

Após o regime permanente impôs-se um regime variável sem chuva. Este regime foi obtido com recurso à variação das temperaturas do ambiente exterior ao longo do tempo. Pela análise dos gráficos das figuras 3.19 e 3.20, observa-se que:

- Com a variação das temperaturas no ambiente exterior os dois sistemas apresentam uma resposta térmica semelhante em que as temperaturas são idênticas;
- A variação de temperaturas no ambiente exterior não se traduz nas variações de temperatura abaixo do XPS (A3 e B3), o que significa que há proteção térmica do conjunto XPS e cobertura verde. Regista-se uma temperatura praticamente constante abaixo do isolamento;
- Verifica-se que a camada de substrato e vegetação permite um atraso térmico de aproximadamente 10 horas na zona A e 11 horas na zona B. Este atraso térmico corresponde diferença temporal entre o instante em que se teve temperatura máxima no ambiente exterior e o instante com temperatura máxima abaixo do substrato (A4 e B4);

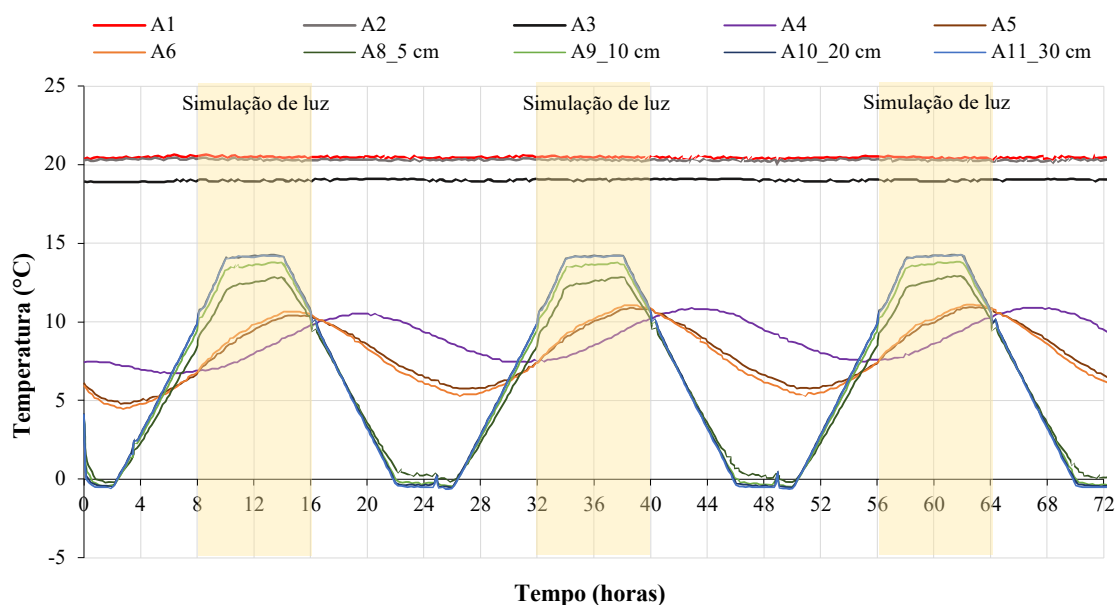


Figura 3.19 -Temperaturas medidas na zona A (cobertura verde modular) ao longo de 72 horas (inverno - regime variável seco).

- Verifica-se a estratificação das temperaturas do ambiente exterior, este fenómeno poderá dever-se ao processo de evaporação e evapotranspiração. Na zona A é mais evidente com a influência da luz, e na zona B com a influência da luz e quando as temperaturas atingem os 0°C.

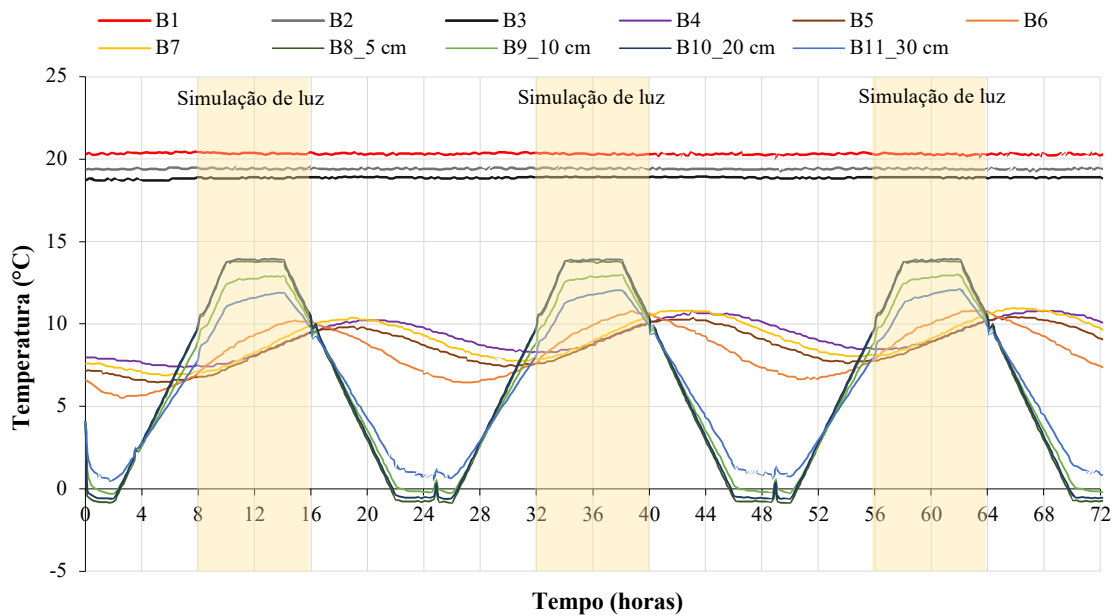


Figura 3.20 - Temperaturas medidas na zona B (cobertura verde convencional) ao longo de 72 horas (inverno - regime variável seco).

Na figura 3.21 estão apresentados os resultados obtidos para os fluxos de calor na superfície do XPS (TF2_A e TF2_B), das duas soluções de cobertura verde. Pela análise do gráfico verificou-se que:

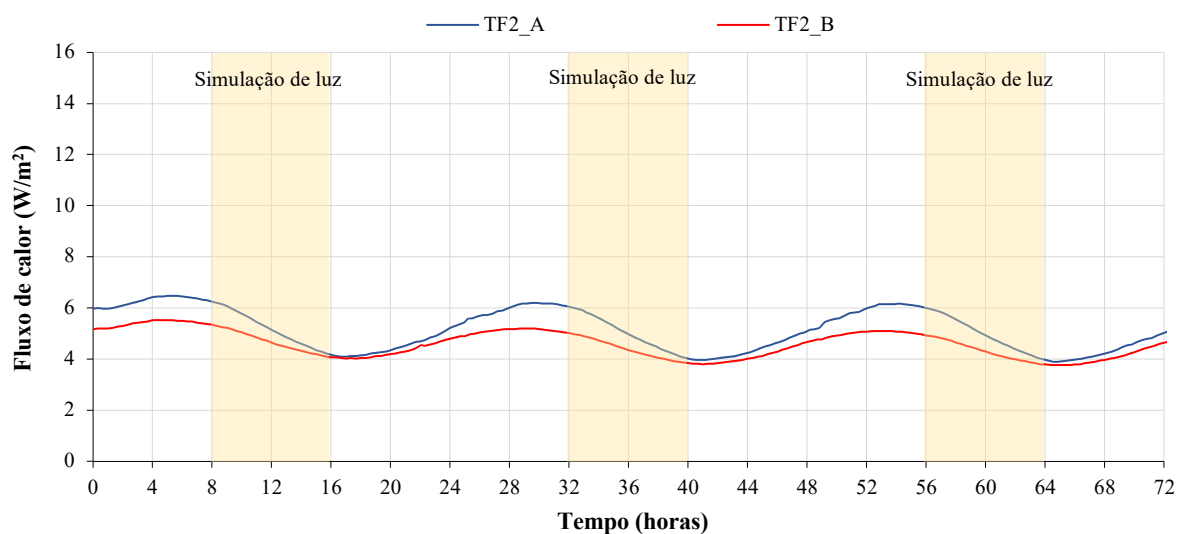


Figura 3.21 - Fluxos de calor medidos na superfície inferior da laje (TF1_A e TF2_A) e sobre o XPS (TF2_A e TF2_B), nas duas soluções de cobertura verde (inverno - regime variável seco).

- O fluxo de calor é menor na zona B que é um sistema contínuo;
- A variação nos fluxos de calor tem um comportamento sinusoidal nos dois sistemas. A amplitude é de 1 W/m^2 .

Nas figuras 3.22 e 3.23 mostram-se os gráficos para o mesmo regime, mas introduzindo a simulação da chuva, tendo-se observado que:

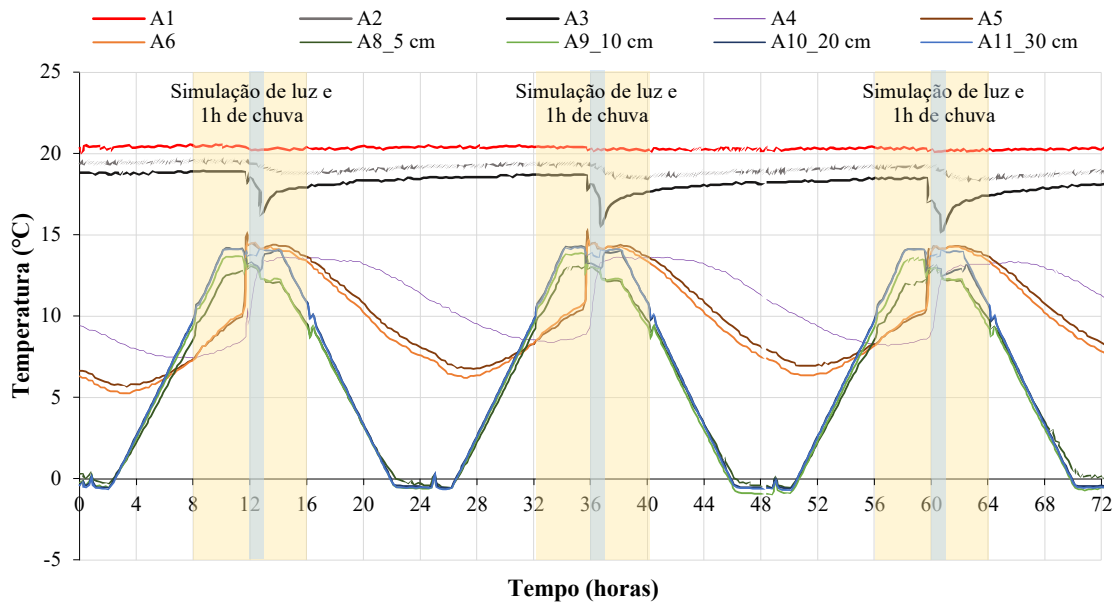


Figura 3.22 - Temperaturas medidas na zona A (cobertura verde modular) ao longo de 72 horas (inverno - regime variável com chuva).

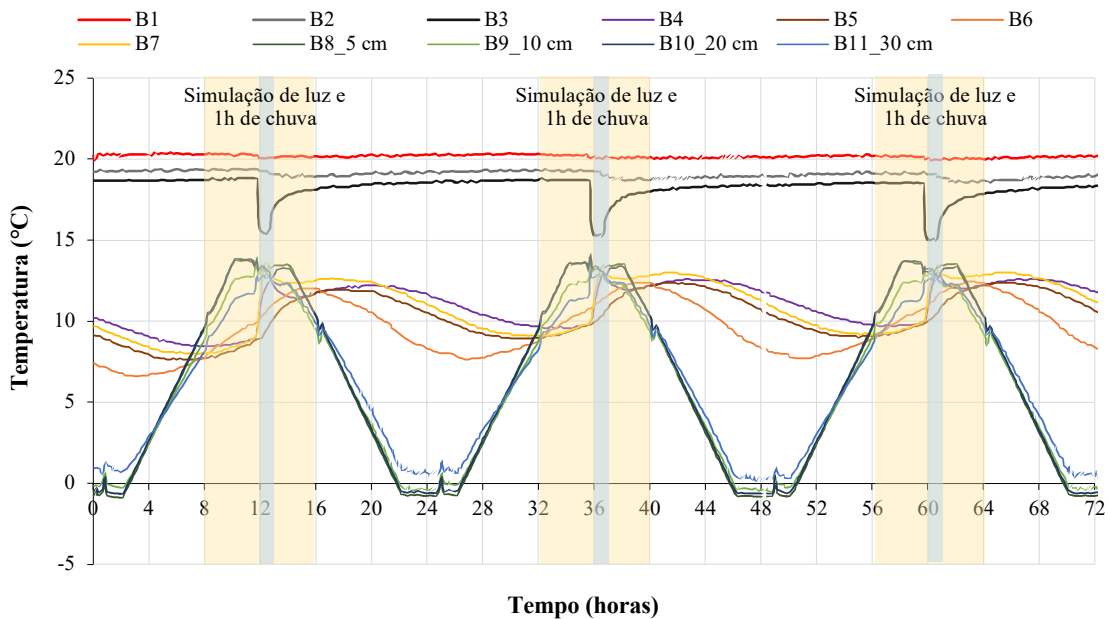


Figura 3.23 - Temperaturas medidas na zona B (cobertura verde modular) ao longo de 72 horas (Inverno - regime variável com chuva).

- Comparando com o regime variável sem chuva, verifica-se que a perturbação das temperaturas se encontra muito localizada no período em que ocorreu a simulação da chuva;
- Observam-se maiores oscilações nas temperaturas do sistema A em relação ao B.

Pela análise dos fluxos de calor apresentados na figura 3.24, verificou-se que

- Com a ocorrência de chuva houve uma variação nos fluxos de calor, devido à aproximação das temperaturas das superfícies exterior da laje e substrato, no entanto, registre-se que os fluxos tendem a estabilizar rapidamente;
- Os fluxos de calor diminuíram no período de chuva devido ao aumento de temperatura no sistema, note-se que a perturbação do fluxo de calor na zona A (TF2_A) tem também a ver com a passagem da água no sistema. No entanto, os fluxos de calor tendem a ter o mesmo comportamento.

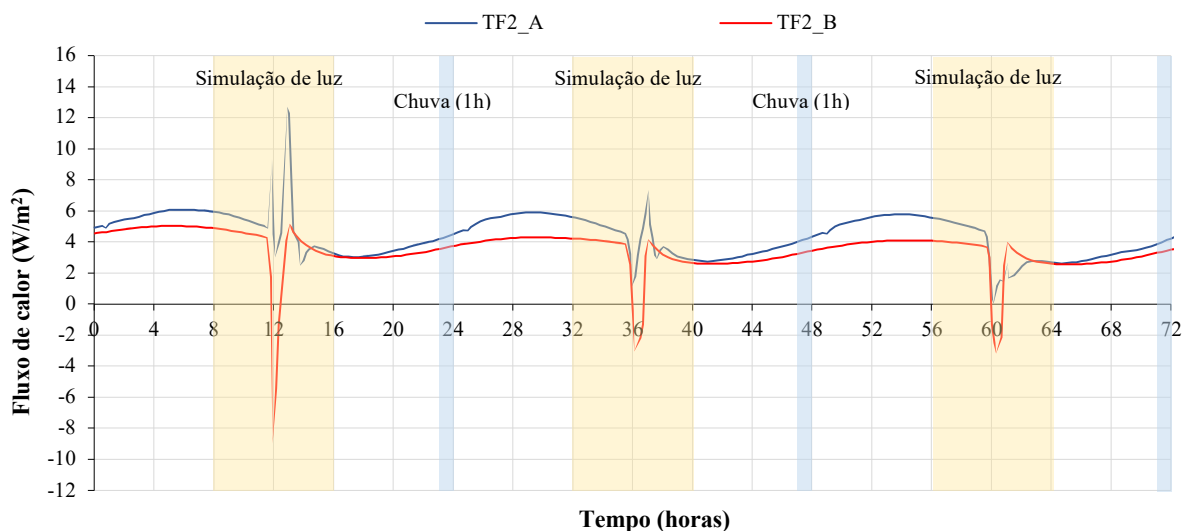


Figura 3.24 - Fluxos de calor medidos na superfície inferior da laje (TF1_A e TF2_A) e sobre o XPS (TF2_A e TF2_B), nas duas soluções de cobertura verde (inverno- regime variável com chuva).

3.2.3.2. Situação de verão

Regime permanente

O comportamento dos sistemas em regime permanente em situação de verão, é semelhante ao do regime permanente em situação de inverno. Sendo assim optou-se por não apresentar os gráficos. Para as mesmas condições de fronteira (temperaturas nos ambientes exterior e interior) e introduzindo a simulação da chuva, observou-se pelos gráficos nas figuras 3.25 e 3.26 que:

- Durante o período de chuva, as temperaturas medidas no ambiente exterior (A8 a A11 e B8 a B11) e no sistema diminuíram;

- Comparativamente à situação de inverno, registou-se uma maior estratificação das temperaturas no ambiente e no sistema;
- Nos dois sistemas, a temperatura na superfície superior da laje (A3) e do ambiente interior (A1) são praticamente iguais, o que mais uma vez, reforça a proteção térmica oferecida pelas soluções da cobertura verde. O mesmo acontece na situação de inverno;
- Se continua a verificar uma resistência térmica significativa na superfície exterior;
- Após o período de precipitação, os sistemas recuperam, em praticamente 24 horas, a mesma distribuição de temperaturas verificada no regime permanente.

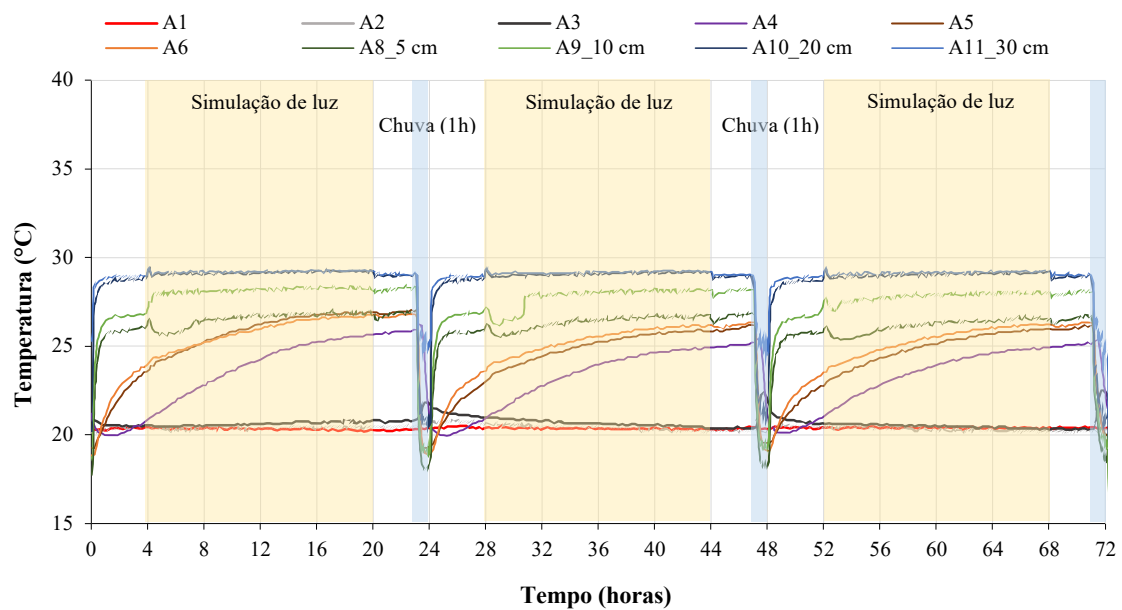


Figura 3.25 - Temperaturas medidas na zona A (cobertura verde modular) ao longo de 72 horas (verão com chuva).

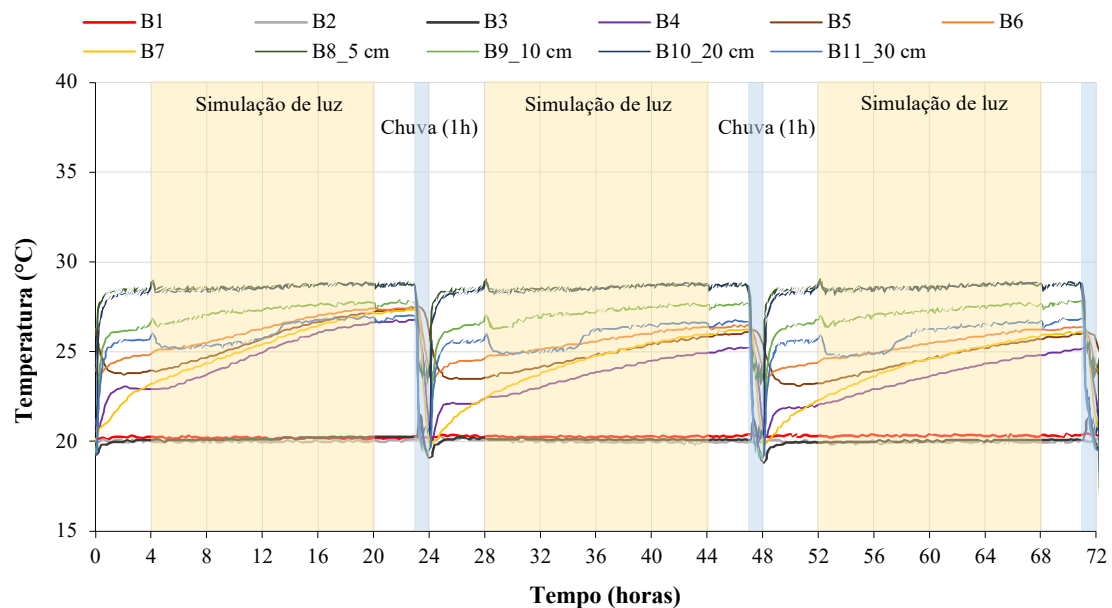


Figura 3.26 - Temperaturas medidas na zona B (cobertura verde convencional) ao longo de 72 horas (verão com chuva).

No gráfico da figura 3.27 estão apresentados os resultados obtidos para os fluxos de calor na superfície do XPS (TF2_A e TF2_B), das duas soluções de cobertura verde. Pela análise do gráfico verificou-se que:

- Com a ocorrência de chuva, verifica-se que os fluxos de calor são maiores na zona A;
- Verifica-se que após o período de simulação de chuva os fluxos estabilizam rapidamente aproximando-se aos valores obtidos no regime permanente seco;
- Com base nos fluxos de calor medidos na camada de XPS (TF2_A e TF2_B) e nas diferenças de temperaturas entre ambientes, obtêm-se coeficientes de transmissão térmica que rondam os $0.38 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, na zona A, e os $0.36 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, na zona B.

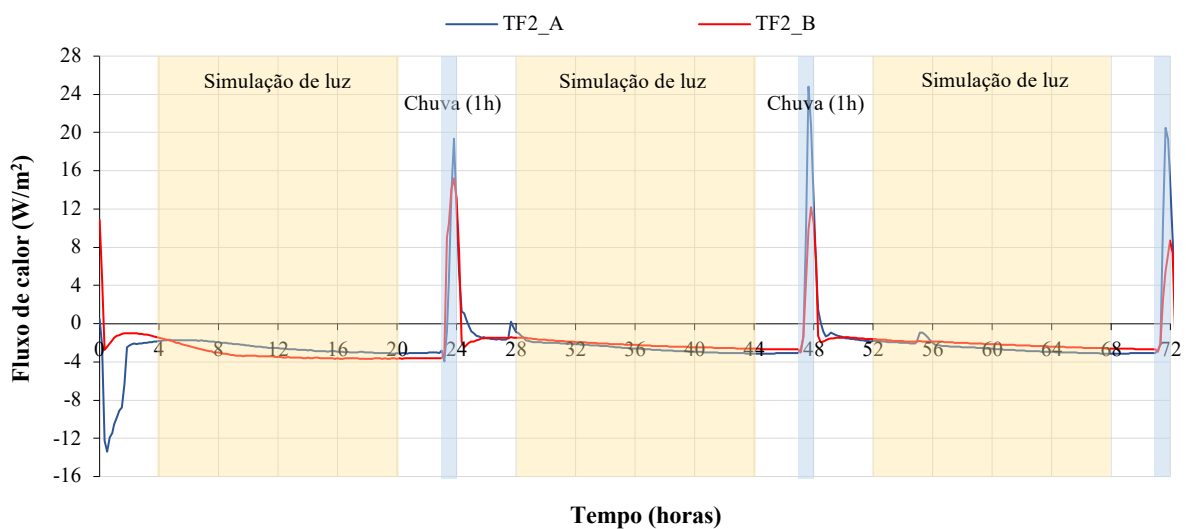


Figura 3.27 - Fluxos de calor medidos na superfície inferior da laje (TF1_A e TF2_A) e sobre o XPS (TF2_A e TF2_B), nas duas soluções de cobertura verde (verão com chuva).

Regime variável

Observando os gráficos de variação de temperatura e de fluxos para o regime variável seco, figuras 3.28, 3.29 e 3.30, constata-se o seguinte:

- À semelhança com o que acontece no regime variável seco (situação de inverno) os dois sistemas apresentam uma resposta térmica semelhante;
- A variação de temperaturas no ambiente exterior não se reflete abaixo do XPS (A3 e B3), onde se verifica temperaturas praticamente constantes (registre-se que este fenómeno não ocorre quando não se tem cobertura verde);
- Verifica-se que a camada de substrato permite um atraso térmico de aproximadamente 10 horas na zona A e 9 horas na zona B, ou seja, na ordem de grandeza do que se tinha verificado no inverno;
- Continua a verificar-se a estratificação das temperaturas do ambiente exterior (superior comparativamente à situação de inverno);

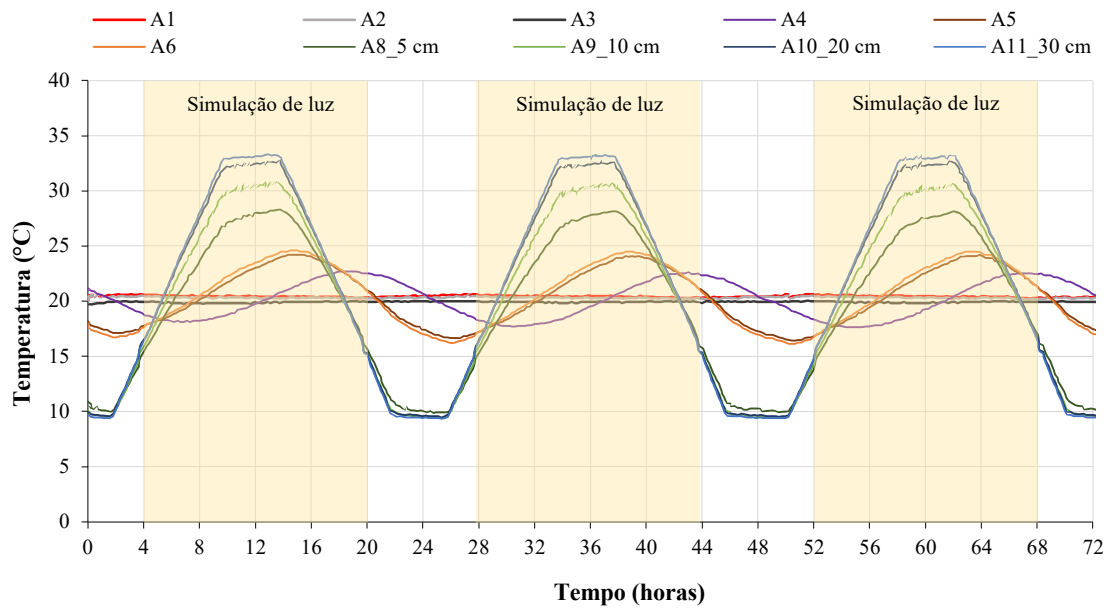


Figura 3.28 - Temperaturas medidas na zona A (cobertura verde modular) ao longo de 72 horas (verão - regime variável seco).

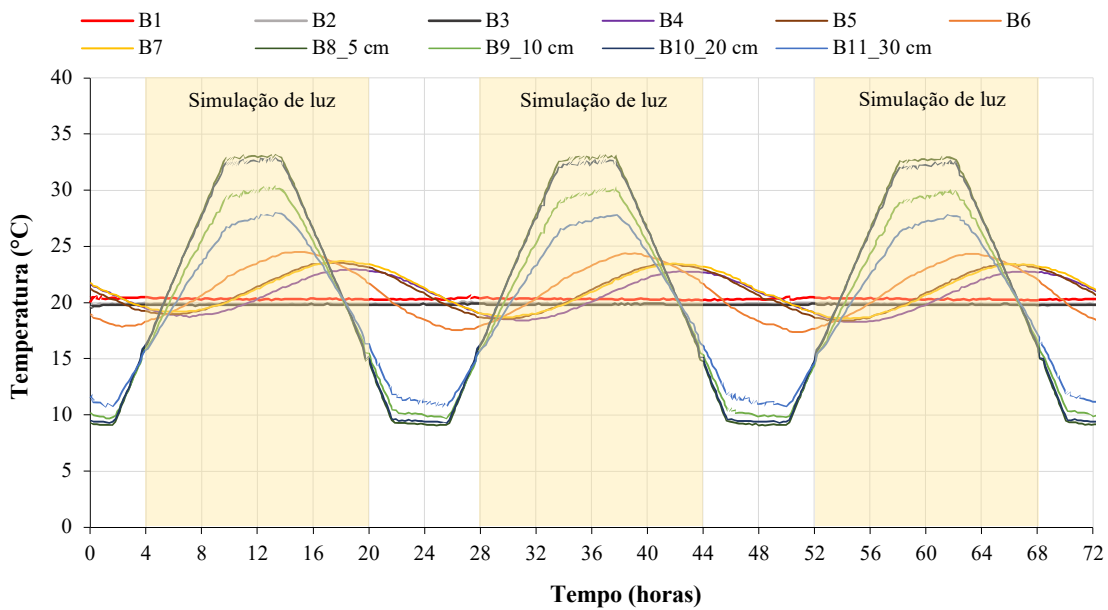


Figura 3.29 - Temperaturas medidas na zona B (cobertura verde convencional) ao longo de 72 horas (verão - regime variável seco).

- Os fluxos apresentam uma variação sinusoidal variando entre valores positivos e negativos, com uma amplitude baixa de 4 W/m^2 . O balanço é, por isso, praticamente neutro, em particular na zona A.

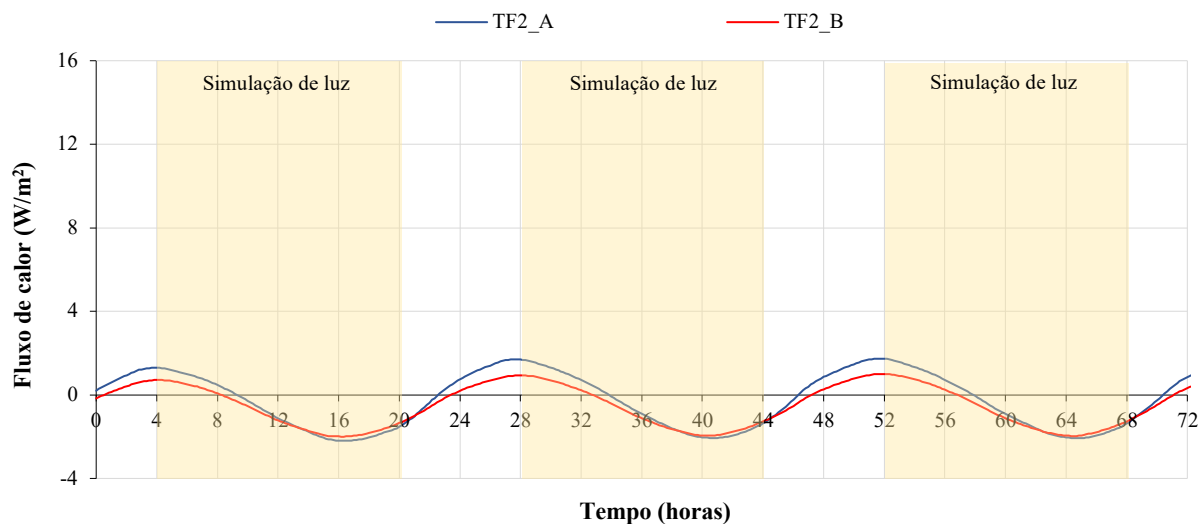


Figura 3.30 - Fluxos de calor medidos na superfície inferior da laje (TF1_A e TF2_A) e sobre o XPS (TF2_A e TF2_B), nas duas soluções de cobertura verde (verão – regime variável seco).

Com a chuva, além da já referida perturbação dos fluxos no período da molhagem, verifica-se uma recuperação do sistema. As amplitudes de fluxo são ainda menores conforme se verifica no gráfico abaixo. Estes fluxos resultam da variação de temperatura dos gráficos das figuras 3.31, 3.32 e 3.33. Nestes gráficos é evidente que a perturbação da distribuição de temperaturas está coincidente com o período da chuva. Estes registos serão úteis para validação de modelos numéricos.

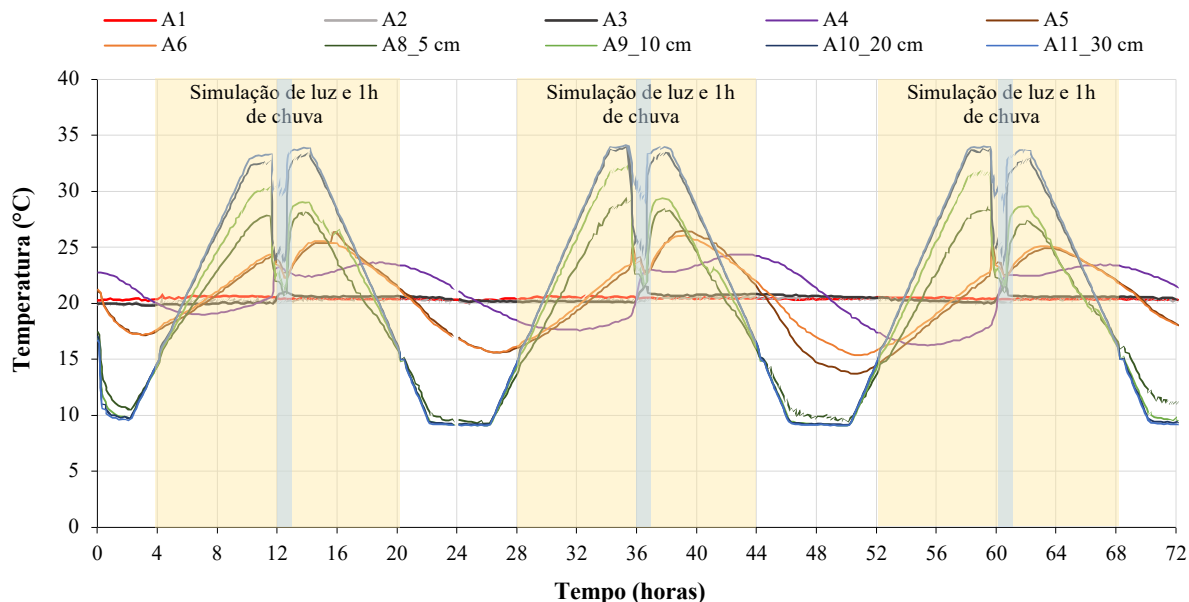


Figura 3.31 - Temperaturas medidas na zona A (cobertura verde modular) ao longo de 72 horas (verão - regime variável com chuva).

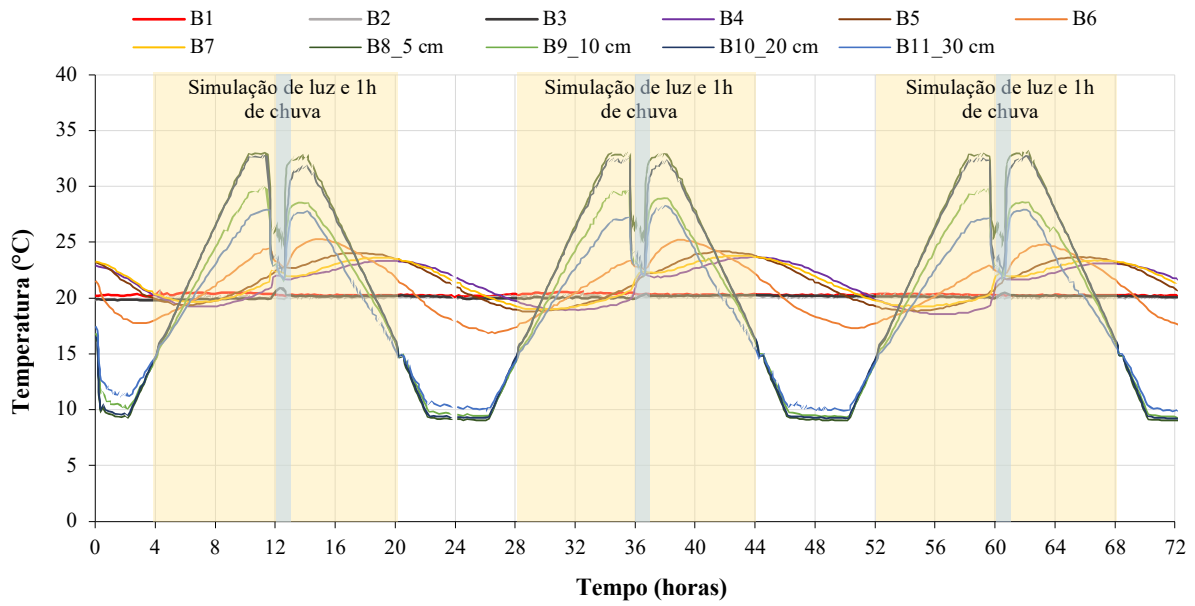


Figura 3.32 - Temperaturas medidas na zona B (cobertura verde convencional) ao longo de 72 horas (verão - regime variável com chuva).

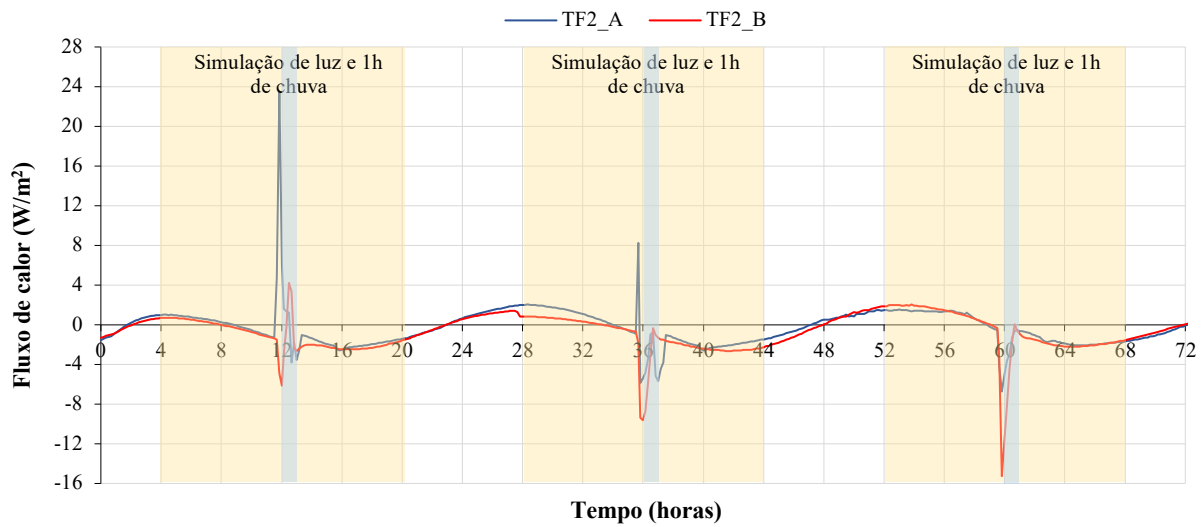


Figura 3.33 - Fluxos de calor medidos na superfície inferior da laje (TF1_A e TF2_A) e sobre o XPS (TF2_A e TF2_B), nas duas soluções de cobertura verde (verão - regime variável com chuva).

3.3. Comportamento hídrico

Na campanha experimental para a determinação da capacidade de drenagem e retenção de água do módulo de cobertura verde foram realizados ensaios para obter a evolução temporal da água escoada. Estes ensaios foram realizados em condições laboratoriais controladas a fim de avaliar o desempenho deste sistema de cobertura verde e caracterizá-lo através da obtenção e quantificação de vários parâmetros físicos. Adicionalmente, complementou-se a avaliação da capacidade de retenção de água com um estudo de avaliação da evolução do teor em água do substrato, no exterior.

3.3.1. Determinação da drenagem e retenção de água (medição em laboratório)

Para a determinação da capacidade de drenagem e retenção do módulo de cobertura verde foi usado como referência o guia alemão *FLL Guidelines (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, 2002)*, por não existir nenhum guia técnico de referência para projeto, instalação e manutenção de coberturas verdes em Portugal.

3.3.1.1. Montagem e descrição do provete de ensaio

Para estes ensaios foram selecionados dois módulos de cobertura verde semelhantes. Os dois módulos são apenas diferenciados pela composição da camada de vegetação, que é naturalmente variável uma vez que inclui um número elevado de espécies que se podem distribuir e desenvolver de uma forma diferente em cada tabuleiro.

De forma a obter valores de referência para caracterizar a capacidade de drenagem/retenção de água dos módulos, foram também feitos dois ensaios sendo um sem tabuleiro e outro com o tabuleiro vazio. Desta forma, esta série de ensaios será composta por:

- Sem tabuleiro (Referência)
- Tabuleiro de polipropileno vazio (T)
- Módulo de cobertura **TLFSV1**, figura 3.34, composto por:
 - Tabuleiro de polipropileno (T)
 - Leca (L): 150 g
 - Filtro geotêxtil (F)
 - Substrato (S): com 8 cm de espessura do tipo Siro® Roof .
 - Vegetação em tapete do tipo herbáceas com *sedum* e gramíneas (V1) da Landlab.

- Módulo de cobertura **TLFSV2**, figura 3.35, composto por:
 - Tabuleiro de polipropileno (T)
 - Leca (L): 150 g
 - Filtro geotêxtil (F)
 - Substrato (S): com 8 cm de espessura do tipo Siro® Roof
 - Vegetação em tapete do tipo herbáceas e gramíneas com *sedum* (V2)



Figura 3.34 - Sistema de cobertura verde (TLFSV1).



Figura 3.35 - Sistema de cobertura verde (TLFSV2).

3.3.1.2. Procedimento de ensaio

Com o objetivo de avaliar a capacidade de drenagem e retenção de água, implementou-se, num ambiente laboratorial controlado (temperatura de 20°C e 60% de humidade relativa), um dispositivo experimental de descarga de água, como mostra a figura 3.36, que permite controlar o volume e caudal de água que se vai aplicar sobre o tabuleiro, assim como monitorizar a quantidade de água escoada. A evolução temporal da água escoada será obtida com recurso a uma balança com capacidade de registo contínuo recorrendo a um computador, com uma frequência de 5 medições por segundo. Desta forma, é possível determinar as taxas de escoamento, a quantidade de água drenada assim como a quantidade de água retida no sistema.

O dispositivo de descarga de água consiste em uma caixa de dimensão igual às dimensões do módulo de cobertura verde (0,5 x 0,5 m) contendo 37 furos de escoamento de 1,5 mm de diâmetro. O número e a dimensão dos furos resultaram de um processo de otimização e afinação do caudal de descarga de água de forma a simular um episódio de precipitação correspondente às recomendações do *FLL*.



Figura 3.36 - Dispositivo experimental para ensaios de escoamento.

Neste procedimento experimental a descarga de água aplicada foi feita de acordo com a metodologia recomendada pelo *FLL* (*Guidelines for the Planning, Execution and Upkeep of Green-roof sites*, 2002, pg. 80), que prevê a saturação do sistema e deixá-lo escorrer durante um período não inferior a 24 horas, de forma a garantir a capacidade máxima de retenção de água. De acordo com as recomendações do *FLL*, a determinação da capacidade de drenagem é calculada para uma área equivalente a um hectare para uma taxa de precipitação de 300 litros/segundo, equivalente a um episódio de precipitação intensa de duração de 15 minutos, que equivale a 27 litros/metro quadrado. Sendo assim, o volume de água a ser aplicado para a área dos módulos de cobertura verde (0.25m²), foi de 6,75 litros. Durante esta campanha foram aplicadas três descargas de água em intervalos de 24 horas entre elas.

Terminado o ensaio é possível quantificar o total de água drenada pelo sistema, o tempo de drenagem e a quantidade de água retida pelo sistema através da diferença de peso do provete antes e depois do ensaio.

O procedimento experimental seguiu os seguintes passos:

- Preparação do módulo e pesagem;
- Processo de saturação, escoamento e pesagem do módulo;
- Colocação do módulo no suporte e protegê-lo com o sistema para a água projetada pela descarga, correntes de ar e efeito evapotranspiração;
- Preparação o dispositivo de ensaio seguindo os seguintes passos:
 - Limpeza o dispositivo de descarga de água de possíveis poeiras ou outros resíduos que possam obstruir os furos, de forma a garantir que a água escorre sem interrupções;
 - Verificação os apoios do dispositivo, deverão estar estáveis e nivelados de forma a garantir a correta drenagem da água do módulo para o reservatório;
 - Colocação o reservatório que vai receber a água escoada sobre a balança (retirar a tara);
- Verificação a balança e o registo no computador;
- Pesagem da água a aplicar no dispositivo de descarga, o que permite simular um evento de chuva com distribuição uniforme;
- Início do registo no computador;
- Após 24 horas, para-se o ensaio, recolhem-se os dados registados e repete-se o procedimento duas vezes;
- Pesagem do módulo de cobertura verde após o ensaio.

Terminado o ensaio são recolhidos os dados registados pelo software procedendo-se o seu tratamento. Este processo vai permitir calcular o total de água drenada pelos módulos ao longo das três descargas, de forma a analisar a sua capacidade drenante (a quantidade de água que o provete drena em função do tempo). Registam-se também as pesagens dos módulos antes e depois do ensaio, para a análise da quantidade de água retida em cada módulo.

De seguida apresentam-se os parâmetros estudados e como serão obtidos/quantificados.

- Massa de água drenada através do provete obtida pelo peso total de água drenada e acumulada no recipiente.

$$M_d = M_a \quad (1)$$

Em que:

M_d – Massa de água drenada pelo módulo (g), após 24 horas;

M_a – Massa de água acumulada no recipiente (g), após 24 horas.

- Massa de água retida pelo provete obtida pela diferença entre o peso inicial do provete (antes do ensaio) e o peso final (após o ensaio).

$$M_r = P_i - P_f \quad (2)$$

Em que:

M_r – Massa retida pelo módulo (g), após 24 horas;

P_i – Peso do módulo antes do ensaio (g), após saturado e escoado 24 horas;

P_f – Peso do módulo após o ensaio (g).

3.3.1.3. Resultados

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados referentes ao ensaio de drenagem e retenção de água em função do tempo. É de salientar que os gráficos apresentados, embora a duração de cada descarga tenha sido de 24 horas, apenas mostram os resultados referentes aos primeiros 60 minutos, de maneira a simplificar e a permitir uma leitura mais clara dos mesmos.

Para a comparação da massa de água escoada acumulada em função do tempo, ir-se-á usar um perfil de referência que corresponde à descarga feita sem tabuleiro. A fim de determinar a capacidade de retenção de água e a influência do tabuleiro vazio, efetuou-se a comparação da quantidade de água drenada acumulada através do perfil obtido na descarga sem tabuleiro, como mostra a figura 3.37. O módulo de tabuleiro vazio reteve 1240g de água, cerca de 18.4% do total de massa de água aplicada na descarga.

Os resultados para a drenagem do sistema de cobertura verde TLFSV1, são apresentados na figura 3.38, para as três descargas realizadas com 24 horas de intervalo entre elas. Verifica-se que na primeira descarga o sistema reteve mais água, cerca de 25% do total de massa de água aplicada, em relação às descargas seguintes. Nas descargas seguintes observa-se uma percentagem de retenção de água compreendida entre os 3.8% e os 5.9%, de acordo com os resultados apresentados na tabela 3.1.

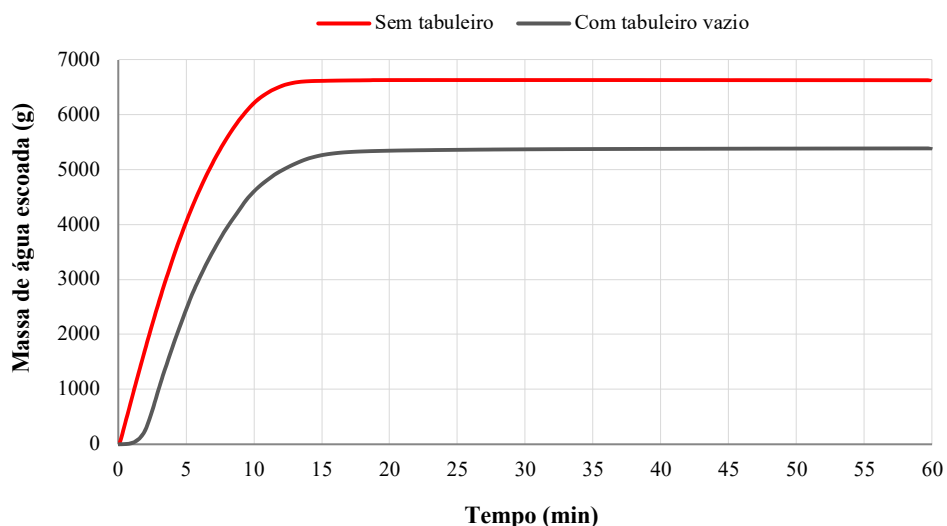


Figura 3.37 - Massa de água escoada acumulada ao longo dos primeiros 60 minutos após descarga para ensaio sem tabuleiro (perfil de referência) e o ensaio com tabuleiro vazio.

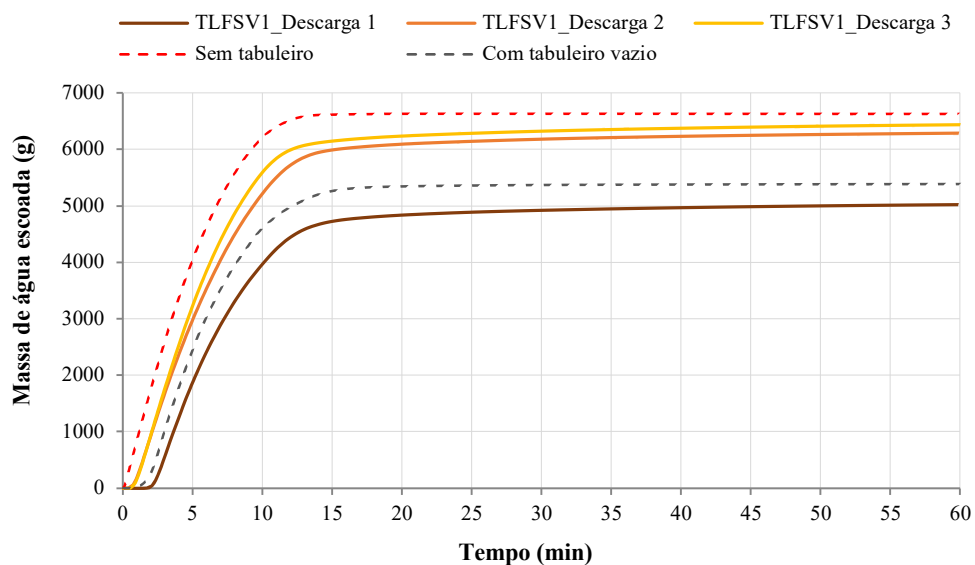


Figura 3.38 - Massa de água escoada acumulada nas três descargas efetuadas, num período de 60 min, para o sistema de cobertura verde TLFSV1.

Nos ensaios de drenagem do sistema de cobertura verde TLFSV2, como mostra a figura 3.39, verificou-se novamente que, para as três descargas realizadas, na primeira descarga o sistema reteve mais água, cerca de 13.6% do total de massa de água aplicada do que nas restantes descargas, porém, a capacidade de retenção de água deste sistema é inferior à do sistema TLFSV1. Nas descargas seguintes observa-se uma percentagem de retenção de água compreendida entre os 5% e os 6.2%, como apresentado na tabela 3.1.

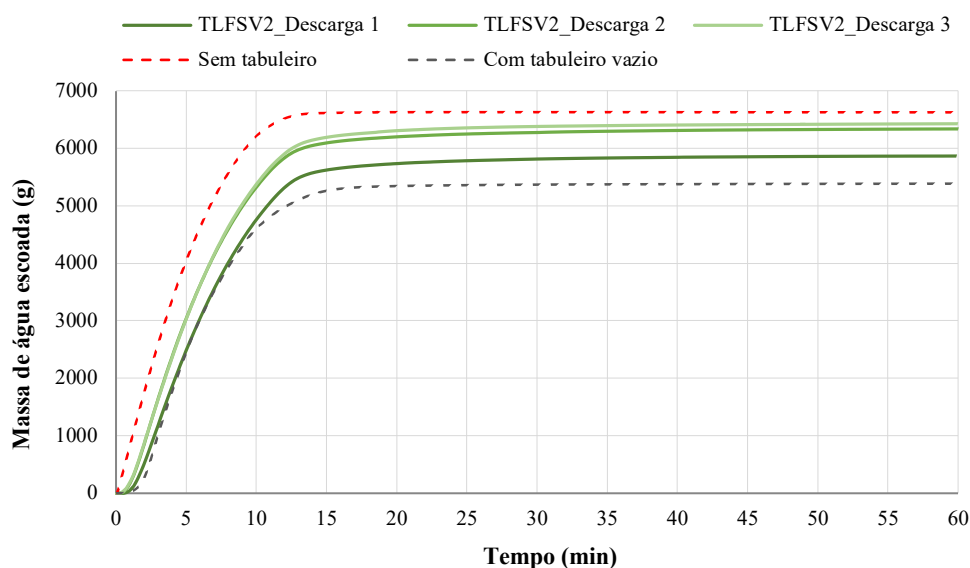


Figura 3.39 - Massa de água escoada acumulada nas três descargas efetuadas, num período de 60 min, para o sistema de cobertura verde TLFSV2.

Tabela 3.1 - Valores da massa total de água drenada e retida no módulo em 24 horas.

Módulo / Descarga	Massa total de água drenada (g)	Massa total de água drenada (%)	Massa total de água retida (g)	Massa total de água retida (%)
TLFSV1				
Descarga 1	5060.2	75	1689.9	25
Descarga 2	6352.2	94.1	397.8	5.9
Descarga 3	6490.5	96.2	259.5	3.8
TLFSV2				
Descarga 1	5831.3	86.4	918.7	13.6
Descarga 2	6333.8	93.8	416.2	6.2
Descarga 3	6413.9	95	336.1	5

Ao comparar os dois módulos de cobertura verde TLFSV1 e TLFSV2, de acordo com a figura 3.40, conclui-se que, em ambos, a percentagem de retenção de água é superior na primeira descarga, sendo no módulo TLFSV1 maior em relação ao TLFSV2 com valores de 25% e 13.6% respetivamente.

A maior retenção de água na primeira descarga deve-se ao facto de uma parte da água aplicada ficar retida nos alvéolos do tabuleiro, mas, a diferença na percentagem de retenção entre os dois sistemas, TLFSV1 e TLFSV2, também pode dever-se ao tipo de vegetação, condições do substrato e densidade da camada de raízes. Nas descargas seguintes não existe uma variação significativa entre os dois módulos de cobertura verde TLFSV1 e TLFSV2, como mostra o gráfico da figura 3.40 e os valores na tabela 3.1.

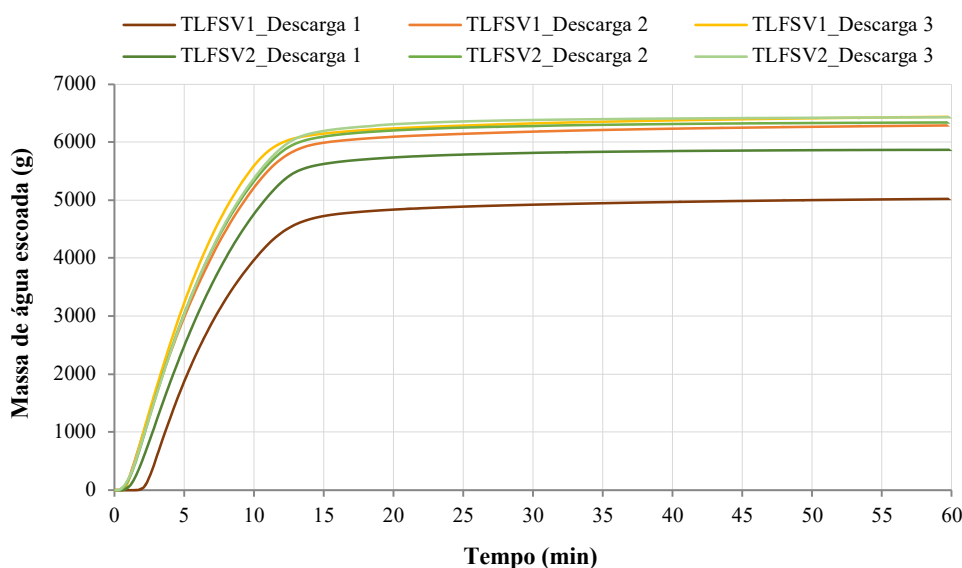


Figura 3.40 - Massa de água escoada acumulada em função do tempo para as três descargas aplicadas aos dois sistemas de cobertura verde TLFSV1 e TLFSV2.

Fazendo uma análise da rapidez de drenagem dos dois sistemas, isto é, o período de tempo gasto para a drenagem de 25%, 50% e 75% da massa total de água aplicada nos módulos nas três descargas, podemos verificar que, em geral, o módulo TLFSV2 a drenagem é mais rápida que no TLFSV1 com mais evidência na primeira descarga, como mostra a tabela 3.2. Nota-se também que o módulo TLFSV1, na primeira descarga, drenou 75% da massa total de água num intervalo de tempo muito superior, o que significa que teve uma capacidade de retenção maior que a TLFSV2. O sistema TLFSV2 apresenta tempos de drenagem praticamente constantes.

Tabela 3.2 - Período de tempo, em minutos, gasto para drenar 25%, 50% e 75% da massa total de água aplicada nos módulos ensaiados.

Módulo / Descarga	Tempo de drenagem (min)		
	25%	50%	75%
TLFSV1			
Descarga 1	4.7	8.2	-
Descarga 2	3	5.7	9.5
Descarga 3	2.9	5.2	8.5
TLFSV2			
Descarga 1	3.7	6.6	11
Descarga 2	3	5.6	9.2
Descarga 3	3	5.5	9

Os sistemas de cobertura verde armazenam uma grande parte da água, mas, qualquer excesso será drenado por percolação. Posto isto, podemos observar nas figuras 3.41 e 3.42 que o caudal de escoamento por metro quadrado do sistema modular TLFSV1 e TLFSV2 no seu pico é menor e mais tardio em relação à curva de referência que representa o caudal de escoamento sem tabuleiro. A descarga de referência (sem tabuleiro) apresenta um caudal máximo de 3640 g. min⁻¹. m⁻² aos 2 minutos. Segundo os gráficos, podemos verificar que os módulos de cobertura verde apresentam uma diminuição no caudal de escoamento e um atraso no escoamento.

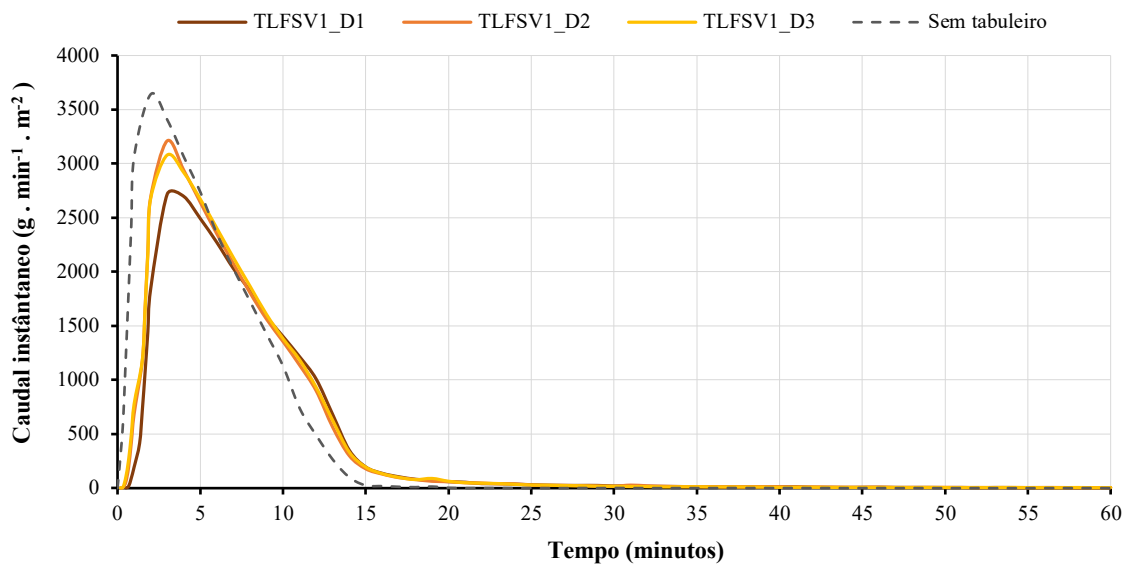


Figura 3.41 - Caudal de escoamento para as três descargas aplicadas, num período de 60 minutos, para o módulo TLFSV1.

Constata-se que a capacidade de retenção nos tabuleiros, TLFSV1 e TLFSV2, é superior na primeira descarga. Isto deve-se ao facto do substrato ainda não se encontrar no seu estado máximo de saturação. Verifica-se também que, após as três descargas o sistema ainda mostra capacidade de retenção, com isto, conclui-se que o substrato é essencial na retenção de água, reduzindo o total acumulado drenado pelos sistemas.

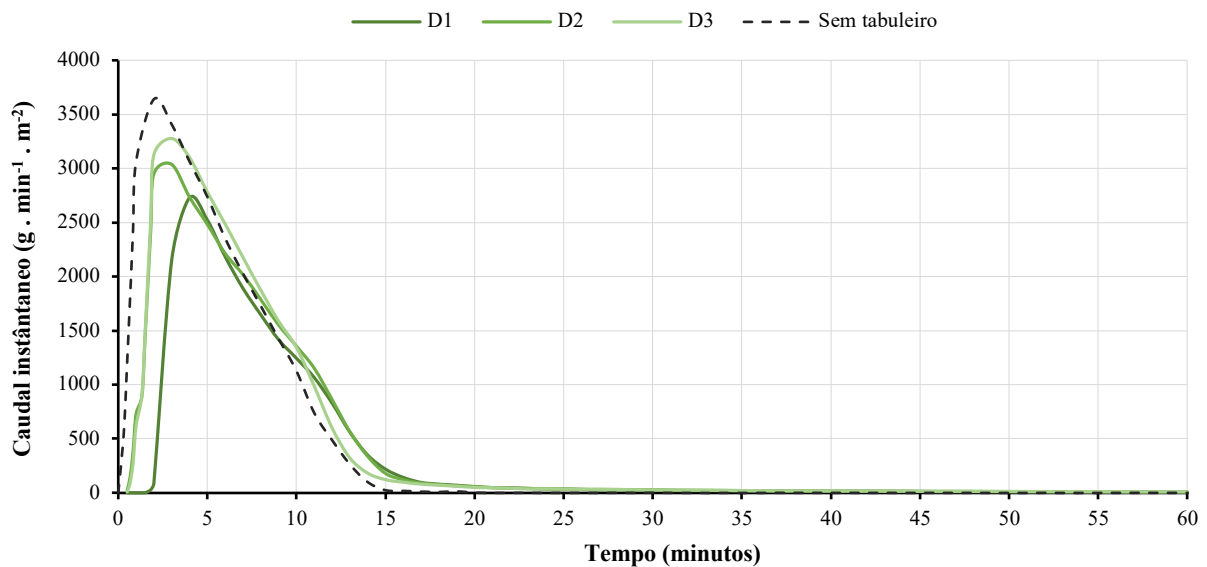


Figura 3.42 - Caudal de escoamento para as três descargas aplicadas, num período de 60 minutos, para o módulo TLFSV2.

3.3.2. Evolução do teor em água (medição no exterior)

O teor em água tem influência no desempenho hidrológico dos sistemas de cobertura verde, e é importante na avaliação da capacidade de retenção de água dos mesmos. Este parâmetro chave irá afetar a adaptabilidade da vegetação, isto é, permite conhecer a tolerância e/ou capacidade das plantas em adaptarem-se a períodos de seca ou de baixa disponibilidade de água no substrato. Para a obtenção deste dado, realizou-se uma campanha experimental, no exterior, durante o período de verão, onde foi avaliado o efeito da temperatura ambiente, radiação solar, humidade relativa e vento, e ainda, o efeito de sombra, nos módulos a ensaiar. Este último caso é útil nos casos de instalações em que haja obstáculos à radiação solar.

3.3.2.1. Montagem e descrição dos provetes de ensaio

Esta campanha experimental foi realizada no exterior do Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade (Itecons), onde foram ensaiados 5 módulos com a constituição descrita na figura 3.43. Os módulos TLFSV1 e TLFSV2 foram os mesmos do ensaio anterior para a capacidade de drenagem e retenção de água.

- Módulo de cobertura com tabuleiro, leca, filtro, substrato e vegetação (TLFSV1):



- Tabuleiro de polipropileno de dimensões 50x50x10 cm;
 - Agregado leve de argila expandida (Leca® Dur);
 - Filtro geotêxtil;
 - Substrato do tipo Siro® Roof;
 - Vegetação *sedum*, herbáceas e gramíneas.
- ⇒ Peso saturado: 21 110 g

- Módulo de cobertura com tabuleiro, leca, filtro, substrato e vegetação (TLFSV2):



- Tabuleiro de polipropileno de dimensões 50x50x10 cm;
 - Agregado leve de argila expandida (Leca® Dur);
 - Filtro geotêxtil;
 - Substrato do tipo Siro® Roof;
 - Vegetação *sedum*, herbáceas e gramíneas.
- ⇒ Peso saturado: 20 834 g

- Módulo de cobertura com tabuleiro, leca, filtro, substrato e vegetação (TLFS):



- Tabuleiro de polipropileno de dimensões 50x50x10 cm;
 - Agregado leve de argila expandida (Leca® Dur);
 - Filtro geotêxtil;
 - Substrato do tipo Siro® Roof.
- ⇒ Peso saturado: 13 412 g

- Módulo de cobertura com tabuleiro metálico e substrato (TS):



- Tabuleiro metálico de dimensões 60x50x10 cm;
 - Substrato do tipo Siro® Roof.
- ⇒ Peso saturado: 14 018 g

- Módulo de cobertura com tabuleiro metálico e leca (TL):



- Tabuleiro metálico de dimensões 60x50x10 cm;
 - Agregado leve de argila expandida (Leca® Dur).
- ⇒ Peso saturado: 450 g

Figura 3.43 - Módulos ensaiados, descrição e o peso em estado saturado.

3.3.2.2. Procedimento de ensaio

Apesar de não haver um procedimento recomendado para este tipo de ensaio optou-se por seguir a metodologia recomendada pelo *FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, 2002)*, para a determinação da capacidade de drenagem e retenção de uma cobertura verde, referido no ponto 3.3.1. Deste modo, os módulos foram previamente saturados por 24 horas e deixados a escoar durante 2 horas. Enquanto isso, preparou-se e verificou-se a balança, figura 3.44, para as pesagens. Após o escoamento, os módulos foram pesados e colocados nos locais previamente definidos para o ensaio.



a)



b)

Figura 3.44 - Equipamento de pesagem e módulos ensaiados: a) Balança utilizada para as pesagens, b) Localização dos módulos: 1. TL, TS, TLFS, TLFSV2 colocados à sombra; 2. TLFSV1 colocado ao sol.

O módulo TLFSV1 foi colocado ao sol, com o objetivo de avaliar a evolução do teor em água, no sistema de cobertura verde, com o efeito da radiação solar, temperatura ambiente, humidade relativa e vento. Os módulos TLFSV2, TLFS, TS e TL foram colocados à sombra com o propósito de avaliar também o efeito de sombra, que é útil nos casos de instalações em que haja obstáculos à radiação solar. Neste ensaio, a precipitação não foi considerada uma vez que o

objetivo é avaliar a perda de água por secagem, deste modo os tabuleiros foram protegidos em caso de chuva.

A campanha experimental teve uma duração de 10 dias, altura em que a vegetação entrou em stress hídrico por falta de água. Foram realizadas pesagens a cada hora (somente no período diurno, e não foram efetuadas pesagens no fim de semana). Deste modo, foi possível obter curvas de secagem do sistema e materiais após molhagem e curvas do teor em água. Os módulos TLFSV1, TLFSV2, por serem sistemas compostos por várias camadas com características diferentes, e uma vez que estas não podem ser levadas até ao estado seco, optou-se por um método de pesagens para a determinação do teor em água médio do sistema. Deste modo, os resultados foram analisados tendo em conta a massa de água perdida por metro quadrado. Este método possibilitou a comparação entre os vários provetes com diferentes dimensões.

O fim do ensaio, foi determinado quando a vegetação entrou em stress hídrico por falta de água, e verificou-se que os módulos com substrato (TLFS e TS) ainda não tinham atingido massa constante. Sendo assim, para a determinação mais exata do teor em água inicial dos módulos, complementou-se o ensaio com a secagem do substrato em estufa ventilada a 70°C até atingir massa constante.

A avaliação, para a evolução do teor em água, foi quantificada pela razão da diferença da massa do material em estado saturado (início do ensaio) e no estado seco, pela massa do material em estado seco, de cada sistema, como mostra a fórmula:

$$m = \frac{M_{sat} - M_{seca}}{M_{seca}} \quad \text{ou} \quad m = \frac{M_{sat} - M_{seca}}{M_{seca}} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

m – Teor em água (g / g ou %)

M_{sat} – Massa em estado saturado (g)

M_{seca} – Massa em estado seco (g)

3.3.2.3. Resultados

No presente subcapítulo são apresentados os resultados obtidos ao longo da campanha experimental, através de gráficos para posterior análise e discussão. Os gráficos apresentados traduzem a massa de água perdida pelos módulos por metro quadrado em relação à temperatura, radiação solar, humidade relativa e vento. A campanha teve a duração de 10 dias, mas, optou-se por analisar os 3 primeiros dias (Dia 1, Dia 2 e Dia 3) por serem os dias em que os módulos, em estado saturado, apresentam a maior perda de massa de água, e os 2 últimos dias (Dia 9 e Dia 10).

Os dados meteorológicos para a monitorização desta campanha de Verão foram recolhidos da estação meteorológica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra (DEM-UC). Na tabela 3.3 estão representados os valores médios da radiação solar, temperatura ambiente exterior e humidade relativa referentes aos dias do ensaio.

Analisando os dados meteorológicos, verifica-se que o dia mais quente durante o ensaio foi o dia 31 de agosto – 23.8°C e o dia com maior radiação solar foi o dia 24 de agosto – 257.6 W/m². Apesar do dia com maior radiação ter sido o dia 26 de agosto, por ser fim de semana e não terem sido efetuadas pesagens, foi considerado o segundo dia com maior radiação que foi o dia 24 de agosto. É de salientar, que houve ocorrência de precipitação durante a campanha, mas esta não foi considerada e os tabuleiros foram protegidos.

Tabela 3.3 - Valores médios da radiação solar, temperatura exterior e humidade relativa durante os 10 dias de ensaio.

	Designação	Radiação solar média (W/m²)	Temperatura exterior média (°C)	Humidade relativa média (%)
22/08/2018	Dia 1	251	23	73.8
23/08/2018	Dia 2	215.5	21.2	80.1
24/08/2018	Dia 3	257.6	22.2	72
25/08/2018	-	250.1	20.3	72.9
26/08/2018	-	265.9	20.9	69.9
27/08/2018	-	118.4	20.7	79.8
28/08/2018	-	55.1	19.4	88
29/08/2018	-	226.7	20.2	76.7
30/08/2018	Dia 9	245.3	20.3	73.5
31/08/2018	Dia 10	248.6	23.8	65

■ Fim de semana ■ Radiação média máxima ■ Temperatura média máxima

Pela análise do gráfico da figura 3.45 referente ao dia 1, visível a influência da temperatura na secagem, em particular nos módulos sem vegetação (TLFS, TS e TL). É visível também que, conforme expetável, o módulo colocado ao sol (TLFSV1) tem uma perda de água bastante superior aos restantes módulos (é visível a influência da radiação solar), os quais se encontram à sombra. Para além da influência das condições climáticas e das características físicas do substrato, a presença da vegetação contribui para uma maior perda de massa de água dos módulos (TLFSV1 e TLFSV2) pelo processo natural de evapotranspiração. Verificou-se ainda que o módulo TL perdeu todo o seu teor em água no primeiro dia de ensaio devido à sua alta porosidade.

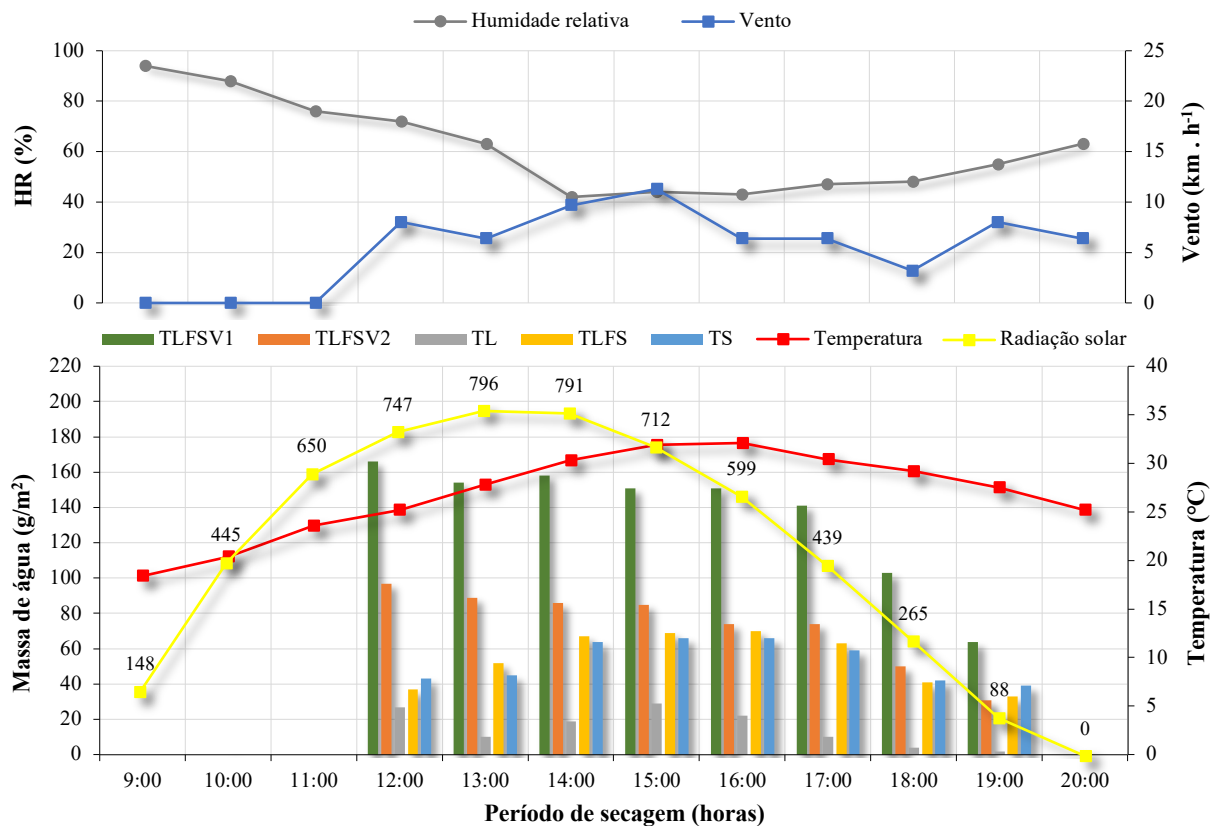


Figura 3.45 - Massa de água perdida, temperatura, radiação solar, humidade relativa e vento registados ao longo do dia 1.

Através da interpretação do gráfico da figura 3.46 referente ao dia 2, verificou-se que, mais uma vez, como expetável, o módulo TLFSV1 (colocado ao sol) apresentou a maior perda de massa de água em relação aos restantes (colocados à sombra). É notável a influência da radiação solar no módulo TLFSV1, como também a influência da temperatura na secagem de todos os módulos.

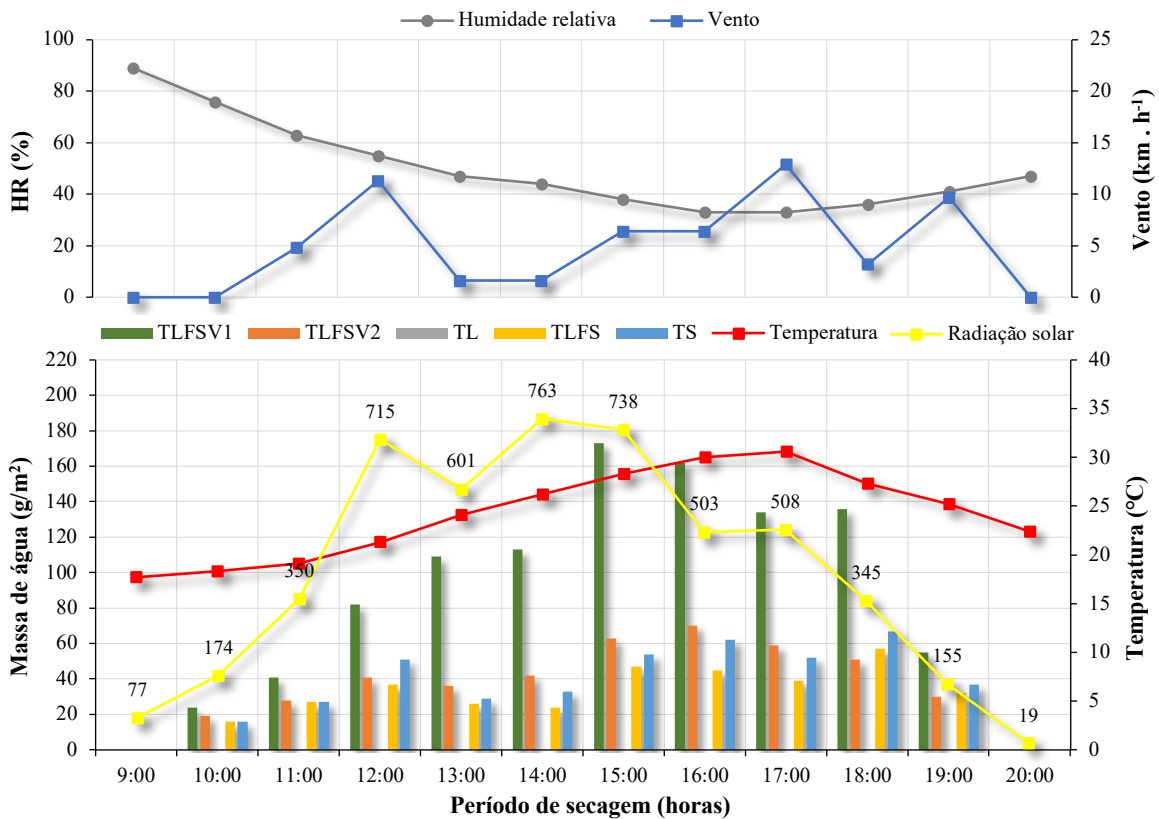


Figura 3.46 - Massa de água perdida, temperatura, radiação solar, humidade reativa e vento registados ao longo do dia 2.

Durante o dia 1 e dia 2, não se verificou que a radiação solar influenciasse significativamente a temperatura exterior, uma vez que, o andamento das duas variáveis de medição não foi o mesmo. No Dia 2, observou-se que a radiação solar apresentou um ritmo irregular, o qual não influenciou a temperatura exterior. Com isto, pode-se concluir que houve influência do vento.

Pela análise da figura 3.47, referente ao dia 3, observou-se que foi o dia que ocorreu a maior perda de massa de água em todos os módulos. Novamente, como exetável, o módulo colocado ao sol (TLFSV1) tem uma perda de água bastante superior aos restantes módulos. Apesar de ter sido o dia considerado no ensaio como o de maior valor de radiação solar média, esta não teve muita influência na secagem do módulo TLFSV1, isto por ter sido um dia com alguma nebulosidade. Neste dia, não se verificou a influência do vento.

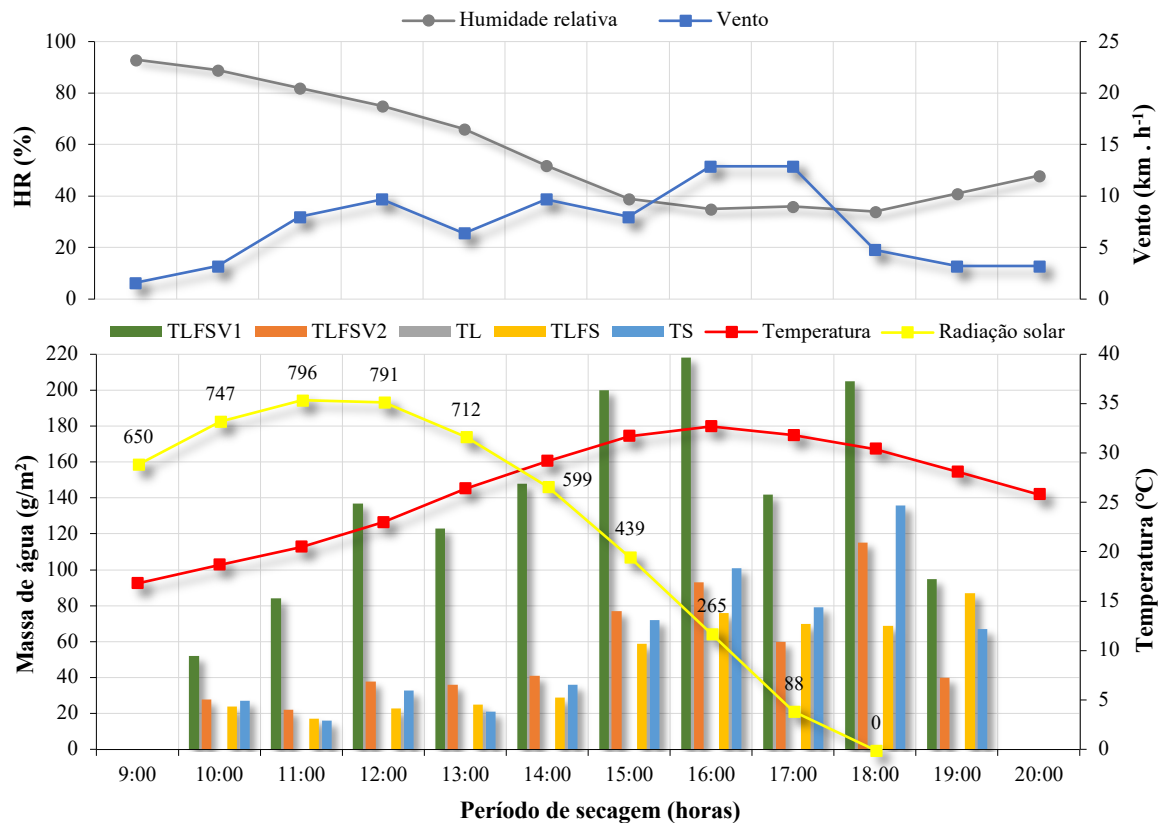


Figura 3.47 - Massa de água perdida, temperatura, radiação solar, humidade reativa e vento registados ao longo do dia 3.

Nas figuras 3.48 e 3.49, estão apresentados os resultados obtidos para os dois últimos dias da campanha experimental. Novamente, é mais visível a influência da temperatura exterior nos módulos que se encontram à sombra (TLFSV2, TLFS e TS). Mais uma vez, não se verificou a influência do vento. Nota-se que, o módulo que se encontra à sombra (TLFSV2) perde mais água do que o colocado ao sol (TLFSV1). Isto pode ser atribuído ao facto do módulo TLFSV1 já se encontrar com falta de água (em stress hídrico). Com isto deu-se por terminado o ensaio, que ocorreu no décimo dia.

De forma geral, durante a campanha, a temperatura e a humidade relativa do ambiente interior mantiveram valores coerentes sendo a humidade mais elevada na primeira metade do dia e menor na segunda metade, enquanto para a temperatura foi observado o inverso. Observou-se também que a radiação solar não teve uma influência significativa na temperatura exterior, uma vez que, o andamento das duas variáveis de medição não foi o mesmo.

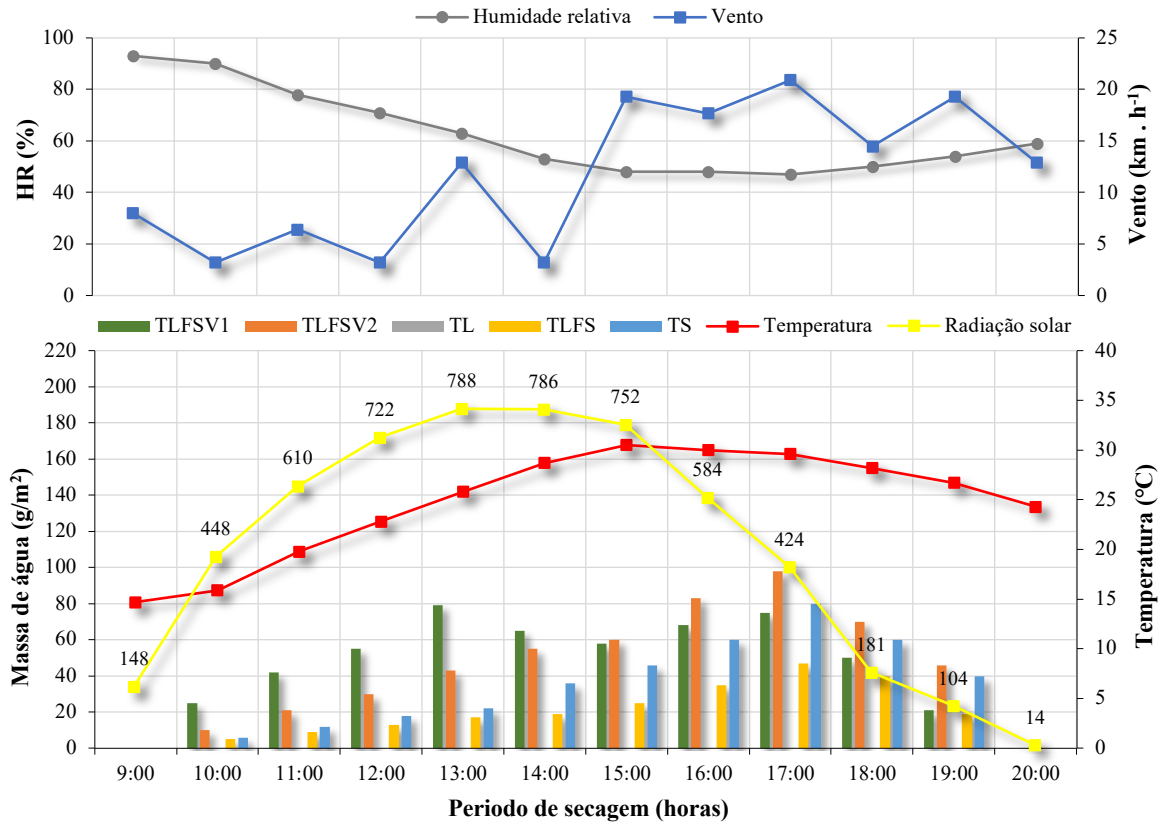


Figura 3.48 - Massa de água perdida, temperatura, radiação solar, humidade reativa e vento registados ao longo do dia 9.

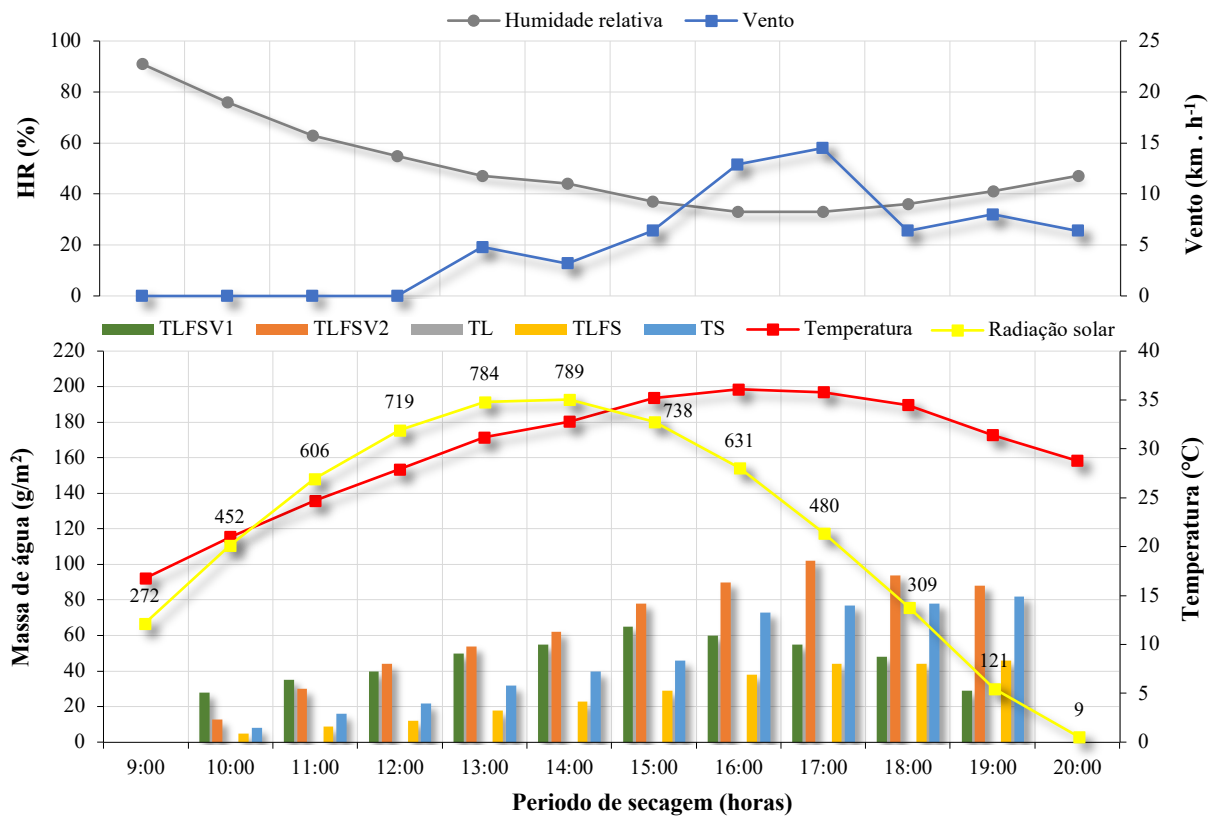


Figura 3.49 - Massa de água perdida, temperatura, radiação solar, humidade reativa e vento registados ao longo do dia 10.

3.4. Comportamento acústico

Como já foi referido no capítulo 2, referente ao Estado da Arte, as coberturas verdes contribuem para a atenuação do ruído ao nível da rua numa área urbana, devido ao elevado coeficiente de absorção sonora do seu sistema. O coeficiente de absorção sonora permite conhecer a capacidade de um material ou sistema absorver energia sonora. Este parâmetro será útil para modelar a atenuação provocada pelas coberturas verdes a uma escala urbana. É com este propósito e também para complementar a caracterização do sistema modular de cobertura verde seleccionado, e já caracterizado quanto ao seu comportamento térmico e hídrico, através dos ensaios realizados e descritos nos capítulos anteriores, que foi organizada a campanha experimental com o objetivo de avaliar o seu comportamento acústico em câmara reverberante.

Nesta campanha experimental, foi avaliado um provete de 12 m² constituído por 48 módulos de cobertura verde. Foi avaliado o efeito do teor em água do sistema na absorção sonora obtida fazendo-se variar o seu estado através da molhagem e secagem. O ensaio em câmara reverberante permite determinar o coeficiente de absorção sonora, do sistema, ao longo de várias frequências. O espectro de frequências com interesse na caracterização das coberturas verdes, foi definido de acordo com a norma EN ISO 354:2007.

O ensaio foi realizado na câmara reverberante do laboratório de acústica do Itecons, ilustrada na figura 3.50, a qual cumpre os requisitos da norma EN ISO 354:2007 em termos de volume (200 m³), difusibilidade do campo sonoro e tempos de reverberação. A difusibilidade do campo sonoro é garantida pela existência de difusores colocados no teto da câmara (figura 3.50).

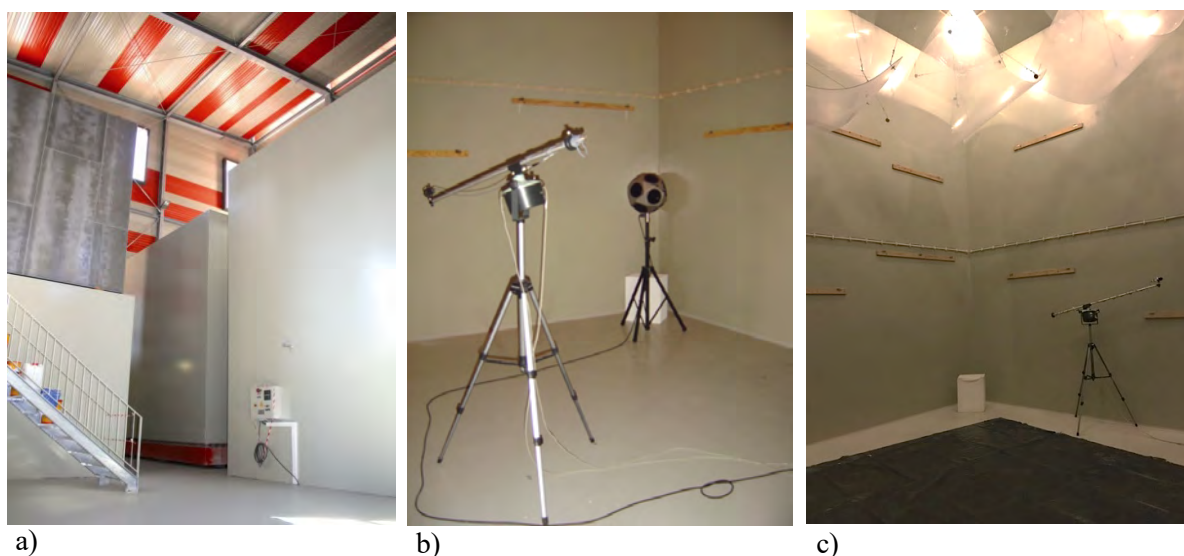


Figura 3.50 - Câmara acústica: a) Exterior da câmara; b) Aparelhos de medição no interior da câmara; c) Elementos difusores colocados no teto da câmara.

3.4.1. Montagem da área de teste e provete de ensaio

A montagem da área de teste na câmara reverberante do laboratório de acústica do Itecons foi feita de acordo com a norma NP EN ISO 354:2007. O provete de ensaio é composto por 48 módulos de cobertura verde e tem dimensões de 4m x 3m x 0.1m, formando um retângulo com 12m² de área. A disposição do provete no interior da câmara, também definida de acordo com a norma em uso, foi efetuada da forma apresentada na figura 3.51. De acordo com a norma, o provete não deve ficar, de preferência, paralelo às paredes mais próximas da câmara, garantindo a distância recomendável compreendida entre 0.75 metros e 1 metro entre qualquer um dos seus pontos e paredes da câmara.

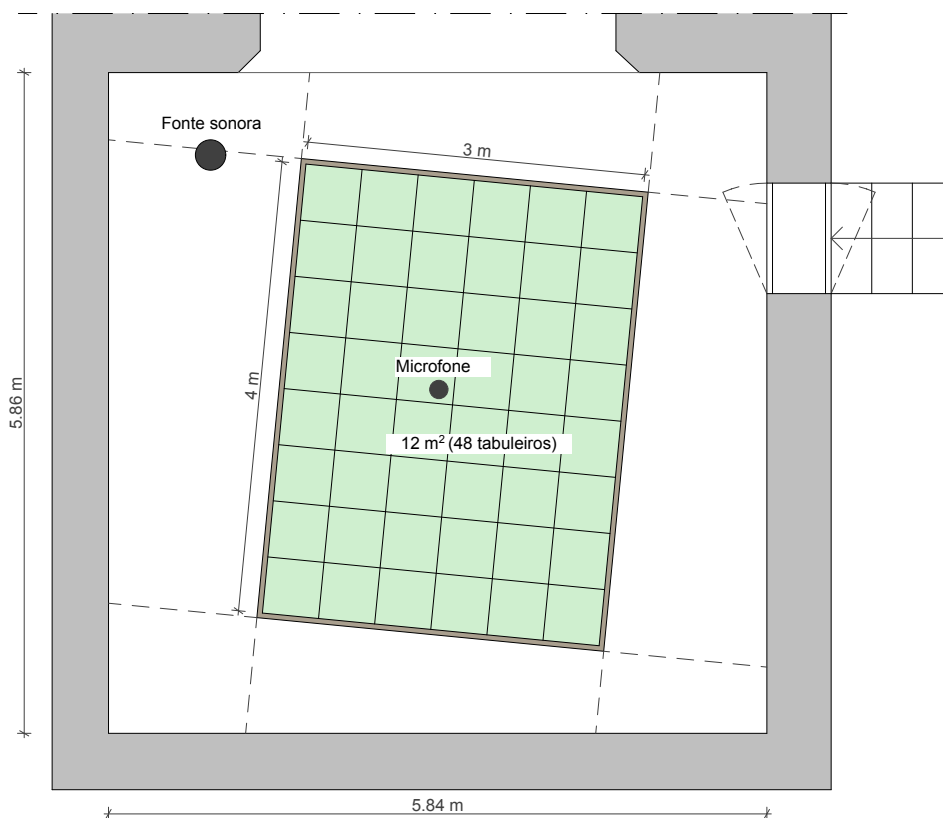


Figura 3.51 - Esquema de montagem do provete de ensaio.

Após definido o esquema de montagem, o provete de ensaio foi colocado diretamente sobre o pavimento da câmara. Este tipo de montagem é considerado montagem do tipo “A”, e prevê também que os bordos do perímetro do provete sejam selados ou cobertos por uma moldura de material acusticamente refletor rígido, sem perfurações e sem espaços de ar entre o provete e a moldura e entre esta e a superfície da câmara, como mostra a figura 3.52.



Figura 3.52 - Provede de ensaio selado com moldura acusticamente refletora.

Neste ensaio foi usada uma moldura de madeira com 35mm de espessura. Como este ensaio tem como objetivo determinar a absorção sonora do provede em diferentes estados através da molhagem (influência da chuva) e secagem, foi colocada uma película de plástico debaixo para reter a água aplicada no provede. Este cuidado deve-se também ao facto de, em caso de alagamento, a água não ter influência nos resultados. Sendo assim definiram-se os quatro estados dos módulos de cobertura verde:

- Estado 1: Os módulos de cobertura encontram-se no seu estado inicial, resultante da exposição às condições climatéricas exteriores reais;
- Estado 2: Os módulos de cobertura são ligeiramente molhados, por forma a simular uma chuva leve;
- Estado 3: Os módulos de cobertura são “secos”, por via do aquecimento e desumidificação da câmara durante 6 dias;
- Estado 4: Os módulos de cobertura são saturados com o objetivo de se simular o estado após um período de chuva intensa.

Para determinar o coeficiente de absorção sonora do sistema ao longo de várias frequências foram utilizados os seguintes equipamentos de medição, apresentados na figura 3.53:

- Uma fonte sonora Omnipower 4292 da Bruel&Kjaer, constituída por vários altifalantes, que emitem o som de forma uniforme e omnidirecional, de forma a gerar o campo sonoro inicial;
- Um microfone do tipo 3923 também da Bruel&Kjaer, para a medição da pressão sonora.

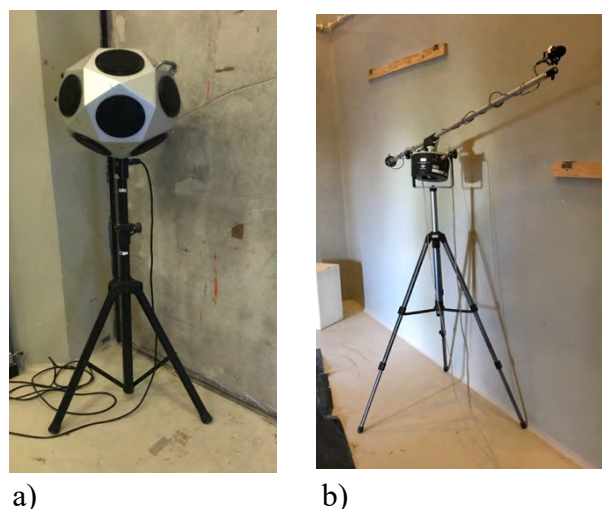


Figura 3.53 Instrumentos de medição: a) Fonte sonora; b) Microfone e tripé.

3.4.2. Procedimento de ensaio

O procedimento de ensaio para a determinação do coeficiente de absorção sonora foi baseado na norma EN ISO 354:2007, que prevê o cálculo do coeficiente de absorção sonora a partir da medição dos tempos de reverberação na câmara com e sem amostra e em condições semelhantes de temperatura e humidade relativa. O princípio geral de medição consiste na medição dos tempos de reverberação médios da câmara com e sem o provete. Uma vez obtidos os tempos de reverberação, calcula-se a absorção sonora do provete recorrendo à fórmula de Sabine, por vezes o valor do coeficiente de absorção sonora é superior a 1 o que acontece devido a uma limitação na fórmula de Sabine.

Os valores de temperatura devem estar compreendidos entre 15 °C e 30 °C e a humidade relativa entre 30% e 90%. A tabela 3.4 apresenta os valores de temperatura e humidade relativa registados para cada ensaio pelo termohigrómetro colocado na câmara reverberante.

Tabela 3.4 - Valores de temperatura, humidade relativa e pressão atmosférica da câmara reverberante durante os ensaios.

	Câmara sem provete			Câmara com provete		
	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Pressão atmosférica (mbar)	Temperatura (°C)	Humidade relativa (%)	Pressão atmosférica (mbar)
Estado 1	19,6	70,1	1017,1	19,7	84,9	1015,6
Estado 2	19,6	70,1	1017,1	19,6	63	1020,1
Estado 3	19,1	57,6	997,6	18,4	59,9	1008
Estado 4	19,1	57,6	997,6	20,4	63	1004,5

O método utilizado para medir o tempo de reverberação foi o do ruído interrompido. Uma fonte sonora omnidirecional emite um ruído uniforme de banda larga, para gerar um campo sonoro uniforme que é registado pelos microfones. Seguidamente, interrompe-se e mede-se o decaimento do nível sonoro ao longo do tempo. Para obter uma boa amostragem espacial, foram consideradas quatro posições distintas de fonte sonora e, para cada posição de fonte sonora três posições de microfones. Foram registadas 36 curvas de decaimentos medindo-se três decaimentos em cada posição de microfone. A avaliação dos tempos de reverberação é feita através das curvas de decaimento obtidas em bandas de frequência de 1/3 de oitava entre 100 e 5000 Hz, e é expresso a partir da média aritmética do número total de medições em cada banda de frequências.

Para se obter o coeficiente de absorção sonora, α , é necessário conhecer-se a área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante vazia, A_1 , e a área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante contendo o provete, A_2 . A diferença destes dois valores é a absorção equivalente do provete, A_T , que será utilizado para o cálculo do coeficiente da absorção sonora, α_s . Para a obtenção destes parâmetros podem ser aplicadas as seguintes expressões:

$$A_1 = \frac{55,3 V}{c_1 T_1} - 4Vm_1 \quad (3)$$

$$A_2 = \frac{55,3 V}{c_2 T_2} - 4Vm_2 \quad (4)$$

Em que:

A_1 – Área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante vazia;

A_2 – Área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante com provete;

V – Volume da câmara reverberante vazia (m^3);

c – Velocidade de propagação do som no ar (m/s);

T_1 – Tempo de reverberação da câmara vazia (s);

T_2 – Tempo de reverberação da câmara com provete (s);

m – Coeficiente de atenuação devido à presença do ar.

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (5)$$

Em que:

α_s – Coeficiente de absorção sonora;

A_T – Área de absorção equivalente do provete ($A_T = A_2 - A_1$);

S – Área do provete (m^2).

Para cada ensaio realizado, determinou-se também a classe de absorção sonora e o coeficiente de absorção sonora ponderado de acordo com a norma EN ISO 11654:1997, designado por α_w , e que representa, o valor lido para a banda de oitava de frequência central 500 HZ na curva de referência, e permite classificar os materiais ou sistemas de acordo com as suas propriedades absorventes. Determinou-se também a absorção sonora média (SAA) de acordo com a norma ASTM C423 – 09^a, obtido pela média aritmética dos valores da absorção sonora para as doze frequências da banda terço de oitava de 200 a 2500 Hz.

Depois de reunidos todos os requisitos para o ensaio e após a montagem do provete e localização da fonte sonora e microfones, como podemos observar na figura 3.54, os equipamentos de medição são cuidadosamente verificados e calibrados. São verificadas também se as portas da câmara estão perfeitamente fechadas e a inexistência de outras aberturas na câmara.



Figura 3.54 - Provete de ensaio colocado na câmara reverberante.

O primeiro ensaio é feito com a câmara vazia para obtenção do valor de absorção sonora de referência que irá permitir avaliar o efeito do provete em estudo. Após o ensaio com a câmara vazia, integrou-se o provete, com $12m^2$ de área total, constituído por 48 módulos de cobertura verde numa configuração de 3m x4 m. A disposição do provete na câmara cumpre os requisitos normativos não sendo paralela às paredes da câmara e garantindo que a distância entre qualquer um dos seus pontos e paredes da câmara fosse superior a 0.75 metros. As condições de

temperatura e de humidade relativa na câmara com o provete eram semelhantes às da câmara vazia.

Durante todos os ensaios foram registadas 36 curvas de decaimentos medindo-se dois decaimentos em cada posição de microfone. Foram consideradas quatro posições de fonte sonora e para cada posição de fonte sonora três posições distintas de microfones.

Realizaram-se 4 ensaios com os módulos de cobertura verde, entre cada ensaio foram sempre verificados os equipamentos e as condições de temperatura e humidade relativa na câmara. Nos 4 ensaios avaliou-se a absorção sonora do provete em diferentes estados, diferenciados pela percentagem de água presente no substrato. A presença de água teve como objetivo caracterizar o sistema modular de cobertura verde após períodos de chuva leve e intensa.

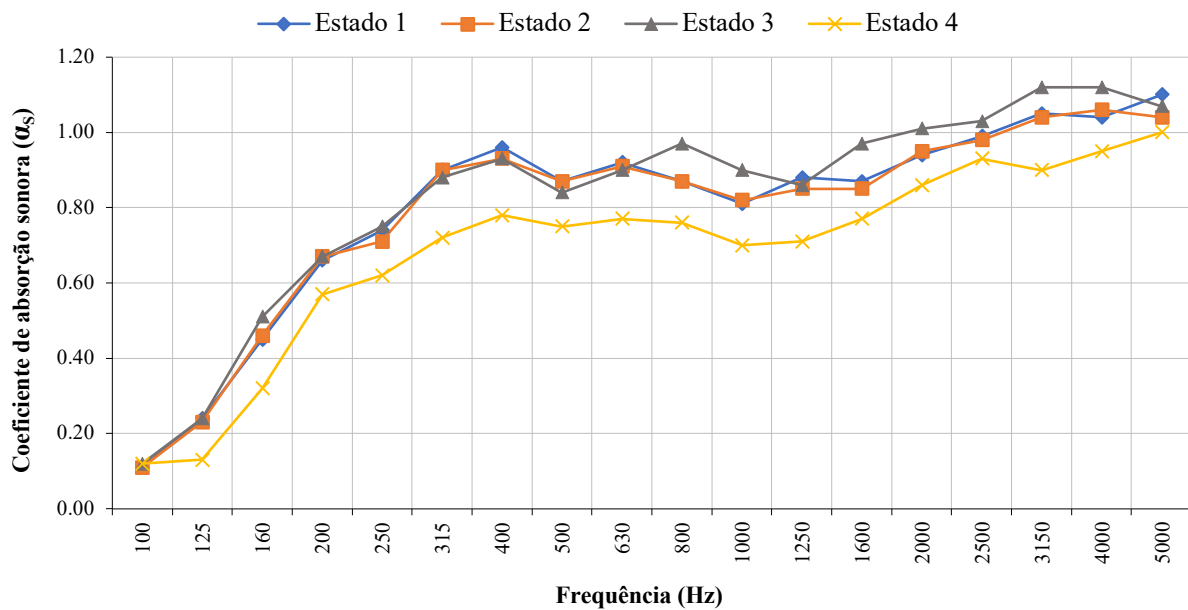
3.4.3. Resultados

Neste subcapítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para a obtenção do coeficiente de absorção sonora em função da frequência em Hertz (Hz) do sistema modular de cobertura verde em estudo. Os resultados da absorção sonora obtidos nos ensaios em câmara reverberante são apresentados em bandas de terço de oitava e correspondem à média dos resultados obtidos em cada ensaio.

No gráfico da figura 3.55, apresentam-se as curvas de absorção sonora para cada estado do provete ensaiado, em condições semelhantes de temperatura, humidade relativa e pressão atmosférica no interior da câmara, como foi apresentado anteriormente na tabela 4. Através da análise do gráfico podemos observar a evolução das curvas de absorção sonora consoante o estado em que se encontra o provete. Relativamente ao provete no Estado 1 e 2, pode-se observar que a molha ligeira da superfície das plantas (Estado 2) não alterou significativamente a absorção sonora do provete de ensaio face às condições iniciais (Estado 1), registando-se variações irrelevantes em toda a banda de frequências.

Por outro lado, observa-se que o provete no Estado 3, após condicionamento no interior da câmara reverberante a seis dias sem rega, é o que apresenta valores de coeficiente de absorção sonora mais elevados em toda a banda de frequências, Estes valores tem mais ênfase a partir dos 800 Hz (com um variação máxima de 0.10), refletindo-se num incremento de 0.05 no valor do coeficiente de absorção sonora ponderado, α_w . O maior coeficiente de absorção sonora obtido foi 1.12 nas frequências mais altas (3150 e 4000 Hz). Como já foi dito no ponto 3.4.2, o

valor máximo do coeficiente de absorção sonora é 1, no entanto neste ensaio foram obtidos valores superiores a 1, sendo assim para efeitos de comparação de resultados os valores analisados são apresentados no gráfico numa escala de 0 a 1.20.



	α_w	Classe	SAA
Estado 1	0.9	A	0.87
Estado 2	0.9	A	0.86
Estado 3	0.95	A	0.89
Estado 4	0.75 (H)	C	0.75

Figura 3.55 - Coeficiente de absorção sonora obtido para cada estado caracterizado, α_w , Classe de absorção e SAA.

O provete no Estado 4, após a saturação, foi o que apresentou valores menores de absorção sonora em toda a banda de frequências, isto pode ser explicado pela presença de uma elevada percentagem de água no provete, o que leva a concluir que o teor em água nos módulos tem uma grande contribuição na variação da absorção sonora.

Salienta-se que o substrato é um material poroso, e ao adicionar água as suas propriedades absorventes diminuem, isto porque, a água vai preenchendo os poros fazendo com que seja mais difícil o som ser absorvido pelo substrato. Comparando os resultados obtidos no estado saturado com os dos valores mínimos de teor de água (Estado 3), registou-se uma redução de 0.20 no valor do coeficiente de absorção sonora ponderado, α_w , e de 0.14 no valor da absorção sonora média, SAA.

Em termos gerais, verifica-se que a absorção sonora diminuiu com o aumento do teor em humidade de acordo com os estados ensaiados, nesta ordem 3, 1, 2, 4. Contudo mesmo com bastante humidade, os valores de absorção sonora apresentados por este sistema são elevados, nomeadamente a partir da frequência 200Hz, o que revela ser um sistema adequado para contribuir para a atenuação do ruído a nível urbano.

Na tabela 3.5 encontram-se apresentados o conjunto de resultados obtidos nos ensaios em câmara reverberante.

Tabela 3.5 - Coeficientes de absorção sonora, α_s , obtidos para cada estado caracterizado.

	Frequências (Hz)																	
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1250	1600	2k	2500	3150	4k	5k
Estado 1	0.11	0.24	0.45	0.66	0.74	0.90	0.96	0.87	0.92	0.87	0.81	0.88	0.87	0.94	0.99	1.05	1.04	1.10
Estado 2	0.11	0.23	0.46	0.67	0.71	0.90	0.93	0.87	0.91	0.87	0.82	0.85	0.85	0.95	0.98	1.04	1.06	1.04
Estado 3	0.12	0.24	0.51	0.67	0.75	0.88	0.93	0.84	0.90	0.97	0.90	0.86	0.97	1.01	1.03	1.12	1.12	1.07
Estado 4	0.12	0.13	0.32	0.57	0.62	0.72	0.78	0.75	0.77	0.76	0.70	0.71	0.77	0.86	0.93	0.90	0.95	1.00

4. Conclusões e trabalhos futuros

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões obtidas ao longo deste trabalho e ainda algumas sugestões de trabalhos futuros no âmbito dos temas apresentados.

4.1. Principais conclusões

A presente dissertação baseou-se no estudo experimental do comportamento térmico, hídrico e acústico de um sistema modular de cobertura verde. Foi estudado um sistema modular de cobertura verde (do tipo extensiva) constituído por: tabuleiro de polipropileno (500mm x 500mm x 100mm), agregado leve de argila expandida (Leca), filtro geotêxtil, substrato e vegetação. Para tal, foram desenvolvidos e realizados vários ensaios onde foram obtidos resultados que, posteriormente, foram tratados e analisados, apresentando-se de seguida as principais conclusões.

Na campanha para o estudo do comportamento térmico foram analisados dois sistemas de cobertura verde: o sistema modular e um sistema convencional que serviu de referência. Estes sistemas foram preparados sobre uma laje de betão isolada com placas de poliestireno extrudido (XPS) e foram instalados na câmara bioclimática. Neste estudo foram caracterizados dois parâmetros: temperaturas (ambientes e superficiais) e os fluxos de calor, obtendo-se as seguintes conclusões:

- Tanto na situação de inverno como na de verão, os dois sistemas de cobertura verde conferem uma elevada proteção térmica, tendo-se verificado um grande gradiente de temperatura entre a superfície superior da laje de betão e o ambiente exterior;
- A vegetação oferece uma resistência térmica apreciável tendo-se verificado uma diferença de temperatura entre a superfície do substrato e o ambiente exterior de cerca de 3 °C);
- Em regime variável, inverno e verão, com a variação das temperaturas no ambiente exterior os dois sistemas apresentam uma resposta térmica semelhante em que as temperaturas são idênticas;
- A camada de substrato + vegetação permitiu um atraso térmico de aproximadamente 10 horas no sistema modular de cobertura verde e 11 horas no sistema convencional de cobertura verde;
- Em comparação com o regime variável sem chuva (inverno e verão), verifica-se que a perturbação das temperaturas se encontra muito localizada no período em que ocorreu a simulação da chuva;

- Após o período de precipitação, os sistemas recuperam, em praticamente 24 horas, a mesma distribuição de temperaturas verificada no regime permanente;
- Na comparação das duas soluções de cobertura verde, modular e convencional, verificou-se que o seu comportamento térmico é semelhante.

Na campanha experimental para o estudo do comportamento hídrico foram realizados dois ensaios. Um de drenagem vertical, em condições laboratoriais controladas, para determinar a capacidade de drenagem e retenção de água. E outro, de análise da capacidade de retenção de água, em condições climáticas reais. Com base nos resultados obtidos no ensaio laboratorial concluiu-se que:

- De um modo geral, os módulos de cobertura verde ensaiados apresentaram boa capacidade drenante e de retenção, verificando-se que a condição do substrato é fator determinante para a eficiência hídrica do sistema;
- Os módulos na primeira descarga apresentaram uma capacidade de retenção de água superior a 13.5% do volume de água da descarga;
- Relativamente à capacidade de drenagem verificou-se ser possível drenar 50% da água descarregada em menos de 8.2 minutos;

Com base nos resultados obtidos no exterior concluiu-se que:

- A radiação solar e a temperatura exterior foram as condições que mais influenciaram a secagem dos módulos ensaiados. Neste ensaio, as médias diárias da temperatura e da radiação solar não excederam os 23.8 °C e 265.9 W/m², respetivamente;
- As capacidades de retenção de água dos módulos com vegetação revelaram capacidade para suportar, sem entrar em stress hídrico e sem rega, um período de 10 dias.

Por último, na campanha experimental para a avaliação do comportamento acústico do sistema modular foi quantificada a absorção sonora (α_w), em câmara reverberante, de um provete de 12 m² constituído por 48 módulos de cobertura verde. O provete foi ensaiado em quatro estados diferenciados pela percentagem de água presente no substrato. Deste ensaio foi possível concluir que:

- A absorção sonora diminui com o aumento do teor em humidade. Mesmo assim, o sistema apresentou valores elevados de absorção sonora em todos os estados ensaiados. O valor mais baixo de α_w foi de 0.75 para o estado saturado, enquanto que, para os outros estados os valores foram superiores a 0.95.

- Os valores de absorção sonora deste sistema de cobertura verde são mais elevados em frequências mais altas (a partir da frequência 200 Hz).

4.2. Proposta de trabalhos futuros

De modo a complementar os resultados já obtidos neste trabalho sugere-se para trabalhos futuros a implementação de modelos numéricos, que poderão ser validados com recurso aos resultados obtidos nos diferentes ensaios.

Para o comportamento térmico seria interessante realizar o mesmo ensaio durante um período mais longo (por exemplo 12 meses) em condições climáticas reais. É importante que seja também monitorizado o teor de humidade do solo.

Seria interessante também dar continuidade à campanha do comportamento hídrico implementando o sistema modular de cobertura verde num sistema de drenagem horizontal com vários metros de comprimento, a fim de, avaliar uma área maior de cobertura verde e a influência, por exemplo, da inclinação da cobertura.

No comportamento acústico seria bastante interessante a caracterização do sistema estudado através da instalação do mesmo num compartimento de teste no exterior (envolvendo as variações climáticas), a fim de, medir o isolamento sonoro a sons aéreos. Se possível, construir um modelo para simulação computacional em simultâneo para comparação de resultados.

Referências bibliográficas

- Ângelo, M. B. P. (2017). Avaliação acústica de componentes que constituem as coberturas verdes. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Coimbra: Universidade de Coimbra.
- António, J., Tadeu, A., Sousa, L., Almeida, R., Tadeu, D. (2016). Absorção sonora de coberturas verdes – um estudo experimental. II Congresso Luso-Brasileiro de materiais de construção sustentáveis.
- António, J., Tadeu, A., Sousa, L., Almeida, R., Tadeu, D. (2018). Airborne sound insulation of green roofs – conventional versus non-conventional components. 42nd IAHS World Congress. The housing for dignity of mankind. Itália.
- Berardi, U., GhaffarianHoseini A., GhaffarianHoseini A. (2014). State of the art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, Vol. 115. pp. 411-428.
- Berndtsson, J. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, v. 32, p.351-360.
- Bevilacqua, P., Mazzeo, D., Bruni, R., Arcuri, N. (2016): “Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area”. *Energy and Buildings*, v.122, p. 63-79.
- Castleton, H.F., Stovin, V., Beck, S.B.M., Davison, J.B. (2010). Green roofs: Building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, v. 42, p. 1582-1581.
- Connelly, M., Hodgson, M. (2015). Experimental investigation of the sound absorption characteristics of vegetated roofs. *Building and Environment*, v.92, p. 335-346.
- Costanzo, V; Evolo, G.; Marletta, L. (2015). Energy savings in buildings or UHI mitigation: Comparison between green roofs and cool roofs. *Energy and Buildings*, v.114, p. 247-255.
- Dunnett, N.; Kingsbury, N. (2008). *Planting Green Roofs and Living Walls*. Timber Press, London, UK.
- Dvorak, B., Volder, A. (2012). Plant establishment on unirrigated green roof modules in a subtropical climate. *Urban Forestry and Urban Greening*, v. 12, p. 28-35.
- Ercolani, G., Chiaradia, E., Gandolfi, C., Castelli, F., Masseroni, D. (2018). Evaluating performances of green roofs for stormwater runoff mitigation in a high flood risk urban catchment. *Journal of Hydrology*, v. 566, p 830-845.
- FFL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau). (2002). *Guidelines for the Planning, Execution and Upkeep of Green-roof sites*.

- Gago, E., Roldan, J., Pacheco-Torres, R., Ordóñez. (2013). The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 25, p. 749-758.
- Getter, K., Rowe, D. Cregg, B. (2009). Solar radiation intensity influences extensive green roof plant communities. *Urban Forestry and Urban Greening*, v. 8, p. 269-281.
- GhaffarianHoseini A., Tookey J., GhaffarianHoseini A., Yusoff, S. M., Hassan, N. B. (2015). State of the art of rainwater harvesting systems towards promoting green built environments: A review. *Desalination and Water Treatment*.
- Kikuchi, S., Koshimizu, H. (2013). A Comparison of Green Roof Systems with Conventional Roof for the Storm Water Runoff. In: Kawakami M., Shen Z., Pai J., Gao X., Zhang M. (eds) *Spatial Planning and Sustainable Development. Strategies for Sustainability*. Springer, Dordrecht.
- Loiola, C., Mary, W., Silva, L.P. (2018). Hydrological performance of modular-tray green roof systems for increasing the resilience of mega-cities to climate chang. *Journal of Hydrology*. Article in press.
- Manso, M., Castro-Gomes, J., Paulo, B., Bentes, I., Teixeira, C. (2018). Life cycle analysis of a new modular greening system. *Science of the Total Environment*, v. 627, p. 1146-1153.
- Orsini, F., Accorsi, M., Luz, P., Tsirogiannis, I., Gianquinto, G. (2016). Sustainable Water Management in Green Roofs. In: T. Younos, T.E. Parece (eds.), *Sustainable Water Management in Urban Environments*. Springer.
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, vol. 103, p. 682–703.
- 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*, v. 11, p. 339-348.
- Sun, T., Grimmond, S., Ni, G. (2016). How do green roofs mitigate urban thermal stress under heat waves? *Geophysical Atmosphere*.
- Van Renterghem, T. (2017). Green roofs for noise reduction: literature review and new approaches. *Inter-Noise Hong Kong*.
- Van Renterghem, T., Forssén, J., Attenborough, K., Jean, P., Defrance, J., Hornikx, M., Kang, J. (2015). Using natural means to reduce surface transport noise during propagation outdoors”. *Applied Acoustics*, Vol. 92, p. 86-101.

Van Renterghem, T., Hornikx M., Forssen J., Botteldooren, D. (2013). The potential of building envelope greening to achieve quietness. *Building and Environment*, Vol 61, pp. 34-44.

Vijayaraghavan, K. (2016). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable energy Reviews*, v. 57, p. 740-752.

Yang, H., Kang, J., Choi, M. (2012). Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level. *Building and Environment*, Vol. 50, pp.44-55.

Yang, J., Yu, Q., Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, v. 42, p, 7266-7273.

Yang, J., Kumar, D., Pyrgou, A., Chong, A., Santamouris, M., Kolokotsa, D., Lee, S. (2018). Green and cool roofs 'urban heat island mitigation potential in tropical climate. *Solar Energy*, v. 173, p. 597-609.

Páginas Web

ACNV@ (2017). Associação Nacional de Coberturas Verdes. <http://www.greenroofs.pt/>

LANDLAB@ (2018) <http://www.landlab.pt/pt/produtos/C/coberturas-verdes>

Zinco@ (2018). <http://www.zinco.pt/>

Green roof (2017). Senate Department for Urban Development and Housing. https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ed611_04.htm

WGINW (2018). World green infrastructure network. <http://www.worldgreenroof.org/own-congresses.html>