



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Pedro Filipe Dias Veríssimo Albino

IMPORTÂNCIA DO SUBSTRATO NO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DAS COBERTURAS VERDES

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente, orientada pelo Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões e pelo Doutor João Almeida e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Fevereiro de 2020

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Pedro Filipe Dias Verissimo Albino

IMPORTÂNCIA DO SUBSTRATO NO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DAS COBERTURAS VERDES

IMPORTANCE OF THE SUBSTRATE IN THE HYGROTHERMAL BEHAVIOR OF GREEN ROOFS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente,
orientada pelo Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões e pelo Doutor João Almeida.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Fevereiro de 2020



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho teve o apoio do Portugal 2020 através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020), através dos projetos com as referências POCI-01-0247-FEDER-033728 (EGR – EcoGreenRoof: Desenvolvimento de eco-materiais para coberturas verdes) e POCI-01-0145-FEDER-016852 (GRLF).

Aos Professores, Nuno Simões e João Almeida, pela orientação prestada ao longo de todo o todo trabalho realizado nesta dissertação.

À arquiteta Katya Coelho, por todo o auxílio e orientação na realização das campanhas experimentais. A toda a equipa do Itecons pela integração e disponibilidade.

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio ao longo da minha vida pessoal e profissional.

Aos meus amigos e em especial, à minha namorada, pela paciência, pelo suporte e por acreditar sempre em mim.

RESUMO

O crescimento dos centros urbanos tem agravado os riscos das alterações climáticas e afetado, de forma relevante, a qualidade de vida das populações. Assim, para além da depleção dos espaços verdes, verifica-se um generalizado aumento da poluição do ar, das águas pluviais e sonora, um aumento do risco de inundações e uma maior dependência energética.

De forma a mitigar estes problemas, têm sido propostas diversas soluções inspiradas na natureza. As coberturas verdes ganharam destaque neste âmbito, principalmente devido aos inúmeros benefícios que lhe são atribuídas, como a melhoria do desempenho térmico dos edifícios, a gestão na drenagem e qualidade das águas pluviais, a integração de novos espaços verdes e a mitigação do efeito de ilha de calor urbano, entre outros.

As coberturas verdes são constituídas por vários componentes, dos quais se destacam as camadas de impermeabilização e drenagem, o substrato e a vegetação. A camada de substrato é, sem dúvida, uma das mais importantes, sendo determinante para o crescimento saudável da vegetação. Para além disso, o substrato, aliado à camada de drenagem, contribui para a capacidade de retenção e para o atraso no escoamento das águas pluviais, assim como para o comportamento térmico da solução final.

Apesar das coberturas verdes já serem apontadas como soluções sustentáveis, é possível melhorar ainda mais o seu desempenho ambiental desenvolvendo substratos técnicos com incorporação de resíduos. A utilização de tais substratos depende, contudo, da demonstração experimental das suas mais valias técnicas quando aplicados a soluções de cobertura.

Nesta perspetiva, a presente dissertação teve como objetivo estabelecer procedimentos de ensaio para caracterizar higratérmica (condutibilidade térmica, permeabilidade ao vapor de água e comportamento dinâmico), ótica (emissividade e albedo) e hidricamente (drenagem e retenção) substratos a utilizar em soluções de cobertura. Alguns destes procedimentos de ensaio foram aplicados na caracterização dos novos substratos, tendo em consideração a quantidade de amostra disponível.

O trabalho realizado permitiu concluir que os novos substratos contendo resíduos apresentam para as propriedades avaliadas, características que os tornam comparáveis com substratos técnicos utilizados em soluções de cobertura verde.

Palavras-chave: Coberturas verdes, Substratos técnicos sustentáveis, Comportamento térmico, Comportamento hídrico, Procedimentos laboratoriais

ABSTRACT

The growth of urban centers has aggravated the risks of climate change and significantly affected the quality of life of the population. Thus, in addition to the depletion of green spaces, there is a generalized increase in air, rainwater and noise pollution and increased risk of flooding and greater energy dependence.

In order to mitigate these problems, several solutions inspired by nature have been proposed. Green roofs gained prominence in this area mainly due to the countless benefits attributed to them, such as the improvement of the thermal performance of buildings, the management of drainage and rainwater quality, the integration of new green spaces and the mitigation of the urban heat island effect, among others.

Green roofs are made up of several components, including the waterproofing and drainage layers, the substrate and the vegetation. The substrate layer is undoubtedly one of the most important as it is decisive for the healthy growth of vegetation. In addition to this, the substrate together with the drainage layer, contributes to the retention capacity and the delay in the drainage of rainwater, as well as to the thermal behavior of the final solution.

Although green roofs are already identified as sustainable solutions, it is possible to further improve their environmental performance by developing technical substrates with incorporation of waste. However, the use of such substrates depends on the experimental demonstration of their technical advantages when applied to covering solutions.

In this perspective, this dissertation aimed to establish test procedures to characterize hygrothermal (thermal conductivity, water vapor permeability and dynamic behavior), optics (emissivity and albedo) and hydric (drainage and retention) substrates to be used in roofing solutions. Some of these test procedures were applied in the characterization of the new substrates, considering the amount of sample available.

The work carried out allowed us to conclude that the new substrates containing residues, present for the evaluated properties, characteristics that make them comparable with technical substrates used in green roofing solutions.

Keyword: Green roofs, Sustainable technical substrates, Thermal behavior, Water behavior, Laboratory procedures

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo.....	ii
Abstract	iii
Índice.....	iv
Índice de Figuras.....	vii
Índice de Tabelas	x
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura da dissertação	4
2 Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Enquadramento Histórico.....	5
2.2 Constituição geral de uma cobertura verde.....	6
2.3.1 Suporte	7
2.3.2 Camada de Impermeabilização.....	7
2.3.3 Camada Drenagem.....	8
2.3.4 Camada Filtrante.....	9
2.3.5 Substrato.....	9
2.3.6 Camada Vegetação	10
2.3 Tipos de Coberturas Verdes	10
2.3.1 Coberturas Verdes Extensivas.....	11
2.3.2 Coberturas Verdes Intensivas.....	11
2.3.3 Coberturas Verdes Semi-Intensivas.....	12
2.3.4 Comparação da Coberturas verdes Extensivas, Semi-Intensivas e Intensivas...	13
2.4 Benefícios das coberturas verdes.....	13
2.4.1 Benefícios Económicos.....	14
2.4.2 Benefícios Ambientais	16

2.5	Custos e Incentivos	19
2.5.1	Custos relativos à construção de uma cobertura verde	19
2.5.2	Incentivos às coberturas verdes	19
3	Materiais e Métodos.....	22
3.1	Descrição dos substratos	22
3.2	Condutibilidade Térmica.....	23
3.2.1	Princípio	23
3.2.2	Condicionamento das amostras	24
3.2.3	Procedimento do ensaio da condutibilidade dos substratos a seco.....	25
3.2.4	Procedimento do ensaio da condutibilidade dos substratos a 23°C/50%HR	26
3.2.5	Procedimento do ensaio da condutibilidade dos substratos a 23°C/80%HR	27
3.2.6	Procedimento do ensaio da condutibilidade dos substratos saturados.....	28
3.3	Emissividade.....	28
3.3.1	Princípio	28
3.3.2	Procedimento.....	29
3.3.3	Condicionamento dos substratos a seco, a 23°C/50%HR e a 23°C/80%HR.....	30
3.3.4	Condicionamento dos substratos saturados.....	31
3.4	Albedo	31
3.4.1	Princípio	31
3.4.2	Procedimento do ensaio	33
3.5	Drenagem e Retenção de Água	35
3.5.1	Princípio	35
3.5.2	Procedimento do ensaio	35
3.6	Permeabilidade ao vapor de água	37
3.6.1	Princípio	37
3.6.2	Procedimento do ensaio	37
3.7	Câmara Bioclimática.....	39
3.7.1	Princípio	39
3.7.2	Montagem do provete	40
3.7.3	Procedimento de ensaio	41

4	Resultados e Discussão	43
4.1	Condutibilidade térmica	43
4.1.1	Condutibilidade térmica em função da massa volúmica.....	44
4.1.2	Condutibilidade térmica em função da temperatura.....	46
4.1.3	Condutibilidade em função do teor de água.....	48
4.2	Emissividade.....	50
4.3	Albedo.....	50
4.4	Drenagem e Retenção de Água	52
4.5	Permeabilidade ao vapor de Água	55
5	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	57
5.1	Principais conclusões	57
5.2	Trabalhos futuros	59
	Referências Bibliográficas	60
	Anexo A	1
	Anexo B.....	1
	Anexo C.....	1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Desenho dos Jardins Suspensos da Babilónia. (Fonte: Costa, 2010).....	5
Figura 2: Vista da Torre Guinigi, em Lucca, Itália. (Fonte: (“Lucca, Torre dei Guinigi Alessandro Mariani Flickr,” n.d.).	6
Figura 3: Componentes de uma cobertura verde. (Fonte: Stahlhöfer & Pereira, 2013).	7
Figura 4: Sistemas de impermeabilização: a) Sistemas de impermeabilização líquida; b) membrana de PVC; c) membrana de impermeabilização (Fonte: mastehousesoluções, Ifambiental, dywaterproofing, 2019).	8
Figura 5: Sistemas de drenagem. a) Manta drenante em poliestireno; b) Argila expandida. (Fonte: a) agricult, 2019; b) leca, 2019).....	8
Figura 6: Exemplo do material usado na camada filtrante, Tela Geotêxtil. (Fonte: archiexpo, 2019).	9
Figura 7:Diferentes tipos de coberturas ajardinadas. (Fonte: resitrix, 2019).	10
Figura 8: Cobertura extensiva. (fonte: Zinco, 2019).....	11
Figura 9: Cobertura Intensiva. (Fonte: Zinco, 2019).	12
Figura 10: Cobertura Semi-Intensiva. (Fonte: Zinco, 2019).	12
Figura 11: Substratos a serem caracterizados.	22
Figura 12:Esquema ilustrativo das etapas de transformação dos resíduos até à sua incorporação nos substratos finais.	23
Figura 13: Aparelhos utilizados nos ensaios. a) HFM 436 Lambda; b) λ -Meter EP500e.	25
Figura 14: Provete utilizado para a realização dos ensaios da condutibilidade.	25
Figura 15: Aparelho TIR, usado na determinação das emissividades.	29
Figura 16: Esquema do funcionamento do aparelho TIR.	30
Figura 17: Estrutura de suporte para o aparelho de medição TIR. a) Aparelho com estrutura de suporte; b) estrutura de suporte	30
Figura 18: Amostra saturada e acomodada no provete para a realização do ensaio.....	31
Figura 19: Aparelho utilizado na medição do albedo, Albedómetro. (Fonte: huksefluxbrasil, 2019).	32
Figura 20:Localização do local de ensaio. Seta vermelho, ilustra a localização exata do ensaio. (Fonte: itecons.uc, 2019).....	33
Figura 21: Tabuleiro utilizado durante o ensaio e suas dimensões.	33
Figura 22: Montagem do provete: a) Revestimento com plástico e com a tela de drenagem; b) Preenchimento com substrato; c) Colocação do termopar.	34
Figura 23: Tabuleiro com vegetação.....	34
Figura 24:Saturação e escoamento da amostra antes de dar início ao ensaio.	36

Figura 25: Representação da estrutura do ensaio de drenagem e retenção. (A- Dispositivo de descarga; B-Estrutura de suporte; C- Estrutura de proteção; D- Módulo da cobertura verde; E- Recipiente; F- Balança).....	36
Figura 26: Preparação do provete para o ensaio da permeabilidade ao vapor de água. a) Colagem da gaze; b) Sílica gel no interior da tina; c) Montagem do conjunto.....	38
Figura 27: Câmara Bioclimática.....	39
Figura 28: Representação esquemática dos dois sistemas (vista em planta). A) sistema convencional; B) sistema com cortiça.	40
Figura 29: Representação da destruição dos termopares e fluxímetros para o corte C1.	41
Figura 30: Representação da destruição dos termopares e fluxímetros para o corte C2.	41
Figura 31: Condutibilidade térmica em função da massa volúmica para os 15 substratos no estado seco.....	44
Figura 32: Condutibilidade térmica em função da massa volúmica, para os 15 substratos com condicionamento a 23°C/ 50%.....	45
Figura 33 Condutibilidade térmica em função da massa volúmica, para os 15 substratos com condicionamento a 23°C/80%.....	45
Figura 34: Condutibilidade térmica em função da massa volúmica, para os 15 substratos com condicionamento saturado.....	46
Figura 35: Representação da condutibilidade para a amostra SR01 em função à temperatura média para as condições de 23°C e a seco, 50% HR, 80% HR e saturado.	47
Figura 36: Representação da condutibilidade para a amostra S03 em função à temperatura média para as condições de 23°C e a seco, 50% HR, 80% HR e saturado.	47
Figura 37: Representação da condutibilidade para a amostra S07 em função à temperatura média para as condições de 23°C e a seco, 50% HR, 80% HR e saturado.	47
Figura 38: Representação da condutibilidade térmica para a amostra SR01 em relação ao teor em água nas condições a seco, a 23°C/50%, a 23°C/80% e saturado.	49
Figura 39: Representação da condutibilidade térmica para a amostra S03 em relação ao teor em água nas condições a seco, a 23°C/50%, a 23°C/80% e saturado.	49
Figura 40: Representação da condutibilidade para a amostra S07 em relação ao teor em água nas condições a seco, a 23°C/50%, a 23°C/80% e saturado.	49
Figura 41: Representação da emissividade para as quatro condições seco, 50%, 80% e saturado.	50
Figura 42: Valores de albedo referentes ao substrato SR01, ao longo do dia 9/10/2019.	51
Figura 43: Representação da radiação global e albedo referente ao substrato SR01, ao longo do dia 9/10/2019.	51
Figura 44: Valores de albedo do tabuleiro com vegetação, ao longo do dia 18/11/2019.	52
Figura 45: Representação da radiação global e albedo referente ao tabuleiro com vegetação, ao longo do dia 18/11/2019.....	52

Figura 46: Massa de água drenada após 60 min da descarga para o ensaio com e sem tabuleiro.
 53

Figura 47: Massa de água drenada nos primeiros 60 min, com e sem tabuleiro e para as três descargas com o substrato SR01 inicialmente saturado..... 53

Figura 48: Massa de água drenada nos primeiros 60 min, com e sem tabuleiro e para as três descargas com o substrato inicialmente às condições ambiente..... 54

Figura 49: Representação da evolução da massa em função do tempo, para os cinco últimos registos das amostras SR01, S07 e S14..... 56

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos telhados verdes consoante os fatores de construção, manutenção e acessibilidade. (Adaptado de <i>Raji, Tenpierik, & Van Den Dobbelsteen, 2015</i>).....	13
Tabela 2: Valores Extremos da Temperatura em Portugal para o ano 2018. (Adaptado de: IMPA, 2019).....	15
Tabela 3: Valores de albedo para os diferentes tipos de superfície. (Adaptado de (Costa, 2010).	17
Tabela 4: Condições e equipamentos utilizados na realização dos ensaios de condutibilidade térmica.....	24
Tabela 5: Dados referentes a cada provete à condição a seco, antes e após a realização do ensaio.	26
Tabela 6: Dados referentes a cada provete às condições 23°C/50%HR, antes e após a realização do ensaio.....	26
Tabela 7: Dados referentes a cada provete às condições 23°C/80%HR, antes e após a realização do ensaio.....	27
Tabela 8: Dados referentes a cada provete à condição saturado, antes e após a realização do ensaio.....	28
Tabela 9: Tabela resumo das amostras de substratos utilizados por ensaio.....	43
Tabela 10: Resultados do teor em água e condutibilidade térmica obtidos à temperatura 10 °C das três amostras.	48
Tabela 11: Quantidade de massa drenada e retida, com o substrato inicialmente saturado para as três descargas.....	54
Tabela 12: Tempo necessário para atingir 25%, 50% e 75% de água drenada, na descarga 1, 2 e 3.....	54
Tabela 13: Quantidade de massa drenada e retida, com o substrato inicialmente às condições ambientes, para as três descargas.....	55
Tabela 14: Massa antes e depois do provete para o ensaio 1 e 2.....	55
Tabela 15: Valores obtidos da determinação de: Variação da massa do conjunto (G), Permeância ao vapor de água (W) e Permeabilidade ao vapor de água (δ).....	56
Tabela 16: Custos referentes à construção de uma cobertura verde extensiva e principais variáveis que determinam esses custos. Adaptado de (H. Aziz, Z.Ismail, 2011)).	1
Tabela 17: Custos referentes à construção de uma cobertura verde intensiva e principais variáveis que determinam esses custos. Adaptado de (H. Aziz, Z.Ismail, 2011).....	1
Tabela 18: Informação do teor em água e condutibilidade térmica à temperatura média de 10 °C.	1

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

As alterações climáticas são os efeitos visíveis da degradação ambiental do planeta, que têm sido associadas às intensivas ações antropogénicas e à libertação de excessivas quantidades de gases com efeito de estufa. Apesar de ser um tema fraturante na sociedade atual, é consensual dentro da comunidade científica que é necessário procurar soluções mais sustentáveis, quer do ponto de vista da conservação dos recursos, quer do ponto de vista de eficiência energética e hídrica.

Com o aumento da população mundial e com o conseqüente crescimento dos meios urbanos, as áreas verdes foram parcialmente substituídas por edifícios, estradas e parques de estacionamento, impactando de forma negativa nos habitats naturais, no escoamento de águas superficiais e no efeito de ilha de calor nas cidades (S. E. Ouldboukhitine et al, 2012). Têm, por isso, aumentado os estímulos dos governos para a adoção de medidas que contribuam para atenuar estes problemas.

Essas medidas passam, em parte, por pequenas ações que todos nós podemos levar a cabo no nosso dia-a-dia, mas principalmente pela generalização da aplicação de tecnologias mais eco-eficientes. As coberturas verdes são o exemplo de um tipo de tecnologia que visa conferir maior sustentabilidade aos edifícios e ao espaço urbano, quando utilizadas em alternativa às coberturas convencionais.

Este tipo de cobertura foi desenvolvido com o intuito de melhorar o desempenho térmico e a integração arquitetónica dos edifícios, aportando inúmeros benefícios, tanto a nível económico como a nível ambiental.

As coberturas verdes contribuem com novos espaços verdes, promovendo o sequestro de dióxido de carbono e a sua conversão em oxigénio. Além disso, através do processo de evapotranspiração, garantem uma redução da temperatura ambiente exterior, mitigando o efeito de ilha de calor urbano. Este efeito deve-se, essencialmente, às propriedades dos materiais utilizados na construção dos edifícios que retêm o calor recebido durante o dia e o libertam durante a noite, aumentando, deste modo, a temperatura média do ar envolvente da cidade (QIU et al., 2013b).

Do ponto de vista térmico, as coberturas verdes desempenham um papel fundamental nos edifícios, uma vez que para além do reforço da resistência térmica, reduzem os ganhos de calor pela cobertura através do sombreamento e do processo de evapotranspiração da vegetação.

Estes efeitos combinados permitem atenuar o consumo de energia necessário para manter o conforto térmico no interior dos edifícios, tanto no verão como no inverno (Barrio, 2002).

As coberturas verdes possuem, ainda, capacidade para reter a água da chuva, permitindo atrasar o escoamento superficial e atenuar o impacto de chuvas fortes em áreas significativamente impermeabilizadas das zonas urbanas (S. E. Ouldboukhitine et al., 2012). Para completar, este tipo de cobertura contribui para reduzir a poluição do ar, atenuar o ruído ambiente, serve de habitat natural e potencia a biodiversidade (Czemieli Berndtsson, 2010).

O sistema de uma cobertura verde é composto por diversas camadas, cada uma com a sua devida importância. Na parte inferior da estrutura encontra-se a camada de suporte, que tem como objetivo dar sustento a todo o sistema. De seguida, encontram-se as camadas de impermeabilização e de drenagem, bem como a camada filtrante. Por fim, encontram-se a camada de substrato e a vegetação (Vijayaraghavan, 2016).

A camada de substrato destaca-se, não só pela sua enorme influência no desempenho de todo o sistema, mas também pela relevância que tem na escolha do tipo de vegetação. A espessura desta camada é de extrema importância, visto que está diretamente associada com o tipo de cobertura (extensiva, semi-intensiva ou intensiva), assim como com o dimensionamento estrutural de todo o sistema (Vijayaraghavan, 2016). São vários os benefícios que dependem desta camada, como é o caso da melhoria da qualidade da água, da redução do pico de cheia e do aumento do isolamento térmico e acústico do edifício (Liu et al., 2019; Vijayaraghavan, 2016). Note-se, a este respeito que, nos últimos anos, tem havido a preocupação de desenvolver substratos com baixa massa volúmica, de forma a diminuir as cargas sobre os edifícios, com especial interesse na aplicação em edifícios existentes. Tem, igualmente, havido a preocupação de desenvolver substratos técnicos com maior adequação às exigências impostas pelas soluções de cobertura verde, em especial de retenção e drenagem.

Apesar das coberturas verdes já aportarem princípios de sustentabilidade, pela sua natureza, tem-se procurado incrementar o desempenho ambiental destas soluções através da incorporação de materiais naturais ou reciclados. Como exemplo, refira-se o projeto *Green Roof and Living Facades* (GRLF), desenvolvido na Universidade de Coimbra, em que se recorreu ao aglomerado de cortiça expandida para substituir os materiais de isolamento térmico e material de retenção/drenante convencionais, cujos resultados podem ser analisados em (Almeida et al, 2019; Tadeu et al, 2019).

Além da melhoria das camadas inferiores da solução, também é possível melhorar os substratos técnicos que sustentam o desenvolvimento da camada vegetal. Um dos objetivos no desenvolvimento de substratos passa pela incorporação de resíduos que assegurem um

desempenho técnico e ambiental adequado e, simultaneamente, não conduzam a um aumento substancial das massas volúmicas.

A avaliação técnica dos substratos impõe a realização de campanhas experimentais, que deverão assegurar a caracterização de parâmetros essenciais para o seu uso em coberturas verdes. Um dos objetivos principais é garantir que novas composições de substrato tenham as propriedades adequadas a um bom desempenho térmico, a uma boa retenção e drenagem de água e compatibilidade adequada ao crescimento saudável das plantas.

1.2 Objetivos

O objetivo principal da presente dissertação é a avaliação de substratos técnicos sustentáveis para aplicação em coberturas verdes. O desenvolvimento destes substratos foi realizado no âmbito do projeto I&D Empresarial em Copromoção EcoGreenRoof (POCI-01-0247-FEDER-033728), assentando na utilização de resíduos industriais de base inorgânica e resíduos urbanos de base orgânica.

Como se espera que estes novos substratos possam vir a substituir os produtos convencionais, é necessário verificar a sua viabilidade técnica, bem como avaliar o seu desempenho nas vertentes térmica e hídrica, das quais dependem os principais benefícios das coberturas verdes, nomeadamente, a redução das necessidades energéticas dos edifícios, a redução do efeito de ilha de calor urbano, a minimização do risco de picos de cheia e a retenção de água necessária para o desenvolvimento das plantas.

Com o objetivo de melhor enquadrar o trabalho desenvolvido no tema, a primeira parte da tese consistiu numa análise da composição típica e variantes das coberturas verdes, sistematizando ainda os principais benefícios deste tipo de soluções.

Uma vez que a caracterização deste tipo de soluções, em muitos aspetos, ainda carece de normalização, houve também a necessidade de estabelecer e descrever procedimentos de ensaio para:

- Avaliar as propriedades térmicas por condução, assumindo o facto de os substratos poderem ter diferentes teores em água;
- Estimar propriedades relevantes no âmbito da minimização do efeito de ilha de calor, nomeadamente emissividade e albedo;
- Caracterizar a capacidade de drenagem e retenção de água dos substratos;
- Determinar a permeabilidade ao vapor de água, relevante na descrição do comportamento higrotérmico da solução;

- Avaliar o comportamento dos substratos em câmara bioclimática, com o objetivo de estudar as soluções em contexto próximo do real.

Após a identificação dos procedimentos de ensaio mais adequados, a fase seguinte do trabalho consistiu na realização de uma campanha experimental que incidiu na caracterização de substratos contendo materiais reciclados e substratos de referência. Note-se que, como os substratos objeto de análise se encontram em fase de desenvolvimento, sendo limitada a quantidade de amostra disponível, não foi possível efetivar o ensaio em câmara bioclimática para o qual se estabeleceu um procedimento de ensaio, bem como estender os vários ensaios a todos os substratos.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação é composta por 5 capítulos, dos quais fazem parte a introdução, a revisão bibliográfica do tema, uma descrição dos materiais e métodos aplicados, a apresentação e a discussão dos resultados e, por fim, um sumário das principais conclusões e trabalhos futuros.

Neste primeiro capítulo introdutório faz-se um breve enquadramento ao tema, apresentando a motivação da dissertação e os seus objetivos.

O segundo capítulo, dedicado à revisão bibliográfica, é subdividido em vários subcapítulos, enquadrando historicamente o tema, identificando os diferentes tipos de coberturas verdes existentes e descrevendo a constituição mais típica deste tipo de sistemas. Também neste capítulo são identificados os benefícios deste tipo de cobertura, finalizando com os custos gerais e incentivos do estado em vários países.

No terceiro capítulo, descrevem-se os substratos utilizados na campanha experimental. Ainda no âmbito deste capítulo é feita uma descrição dos princípios e procedimentos dos ensaios realizados (condutibilidade térmica, emissividade, albedo, drenagem, retenção de água e permeabilidade ao vapor de água).

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos e é realizada uma discussão dos mesmos à luz dos objetivos definidos.

Por fim, no quinto capítulo, tecem-se as principais conclusões e sinalizam-se possíveis trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Enquadramento Histórico

As primeiras referências históricas de coberturas verdes remetem-nos para os famosos Jardins Suspensos da Babilónia, 600 a.C., na Mesopotâmia, (Magill et al, 2011). Este tipo de construção, que utilizava jardins na sua cobertura, conforme ilustra a figura 1, denominavam-se de Zirugates e tinham como principal função proteger o interior das construções do intenso calor da Babilónia. O zigurate mais famoso é o Etemenanki, na região da antiga Babilónia (Irão), sendo que o melhor preservado é o de Nanna, na antiga cidade de Ur (Shimming, 2012).

Segundo (Steven W. Peck & Callaghan, 1999), os jardins verticais e coberturas verdes marcaram presença durante o Império Romano, sobretudo em edifícios institucionais.

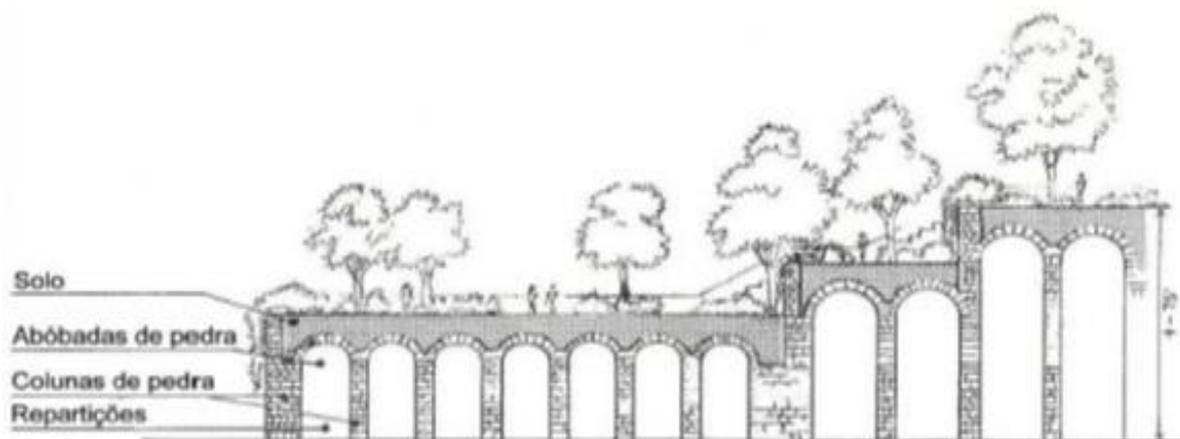


Figura 1: Desenho dos Jardins Suspensos da Babilónia. (Fonte: Costa, 2010).

A Torre Guinigi (figura 2), convencionalmente designada como Torre de Benettoni, localizada na cidade de Lucca, em Itália, é um exemplo importante deste tipo de construção, que nos remete para o Renascimento. Com uma altura de 36,5m, esta torre difere das outras, pois contém plantados na sua cobertura carvalhos de grande porte. Outros exemplos de coberturas ajardinadas da época Renascentista são o Palácio Piccolomini, na cidade Pienza, em Itália, e o Mosteiro do Mont Saint Michel, Normandia, em França (Costa, 2010).



Figura 2: Vista da Torre Guinigi, em Lucca, Itália. (Fonte: (“Lucca, Torre dei Guinigi | Alessandro Mariani | Flickr,” 2019).

Mais tarde, já na década 1920, os fundadores do movimento moderno na arquitetura, Le Corbusier e Frank Lloyd Wright, incentivaram a construção de coberturas verdes, pois estas devolviam o espaço verde eliminado para a construção do edifício (H. Aziz, Z.Ismail, 2011).

Na década de 1980, na Alemanha, houve uma enorme expansão, 15 - 20% anualmente, no mercado dos telhados verdes. Esse crescimento repentino adveio de incentivos e legislação aplicada por parte do governo na construção deste tipo de coberturas, que doava entre 35 a 40 Marcos Alemães, por metro quadrado de telhado. Esta estratégia foi adotada por outros países europeus, em médias e grandes cidades. Por exemplo, na Áustria, mais propriamente em Viena, o governo forneceu subsídios e subvenções para a instalação de telhados verdes. Nas cidades de Stuttgart e Mannheim, na Alemanha, foi aprovada uma lei que exigia a instalação de telhados verdes em todos os edifícios industriais. Estas leis e apoios governamentais, levaram ao aparecimento de uma nova indústria de materiais, plantas e equipas de profissionais para a construção e manutenção deste tipo de cobertura. Esta prática tornou-se comum em vários países Europeus, como por exemplo Alemanha, França, Áustria, Noruega e Suíça (Steven W. Peck & Callaghan, 1999).

2.2 Constituição geral de uma cobertura verde

As coberturas verdes são sistemas constituídos por vários componentes dispostos de maneira lógica, de modo a otimizar todo o sistema. São seis os componentes que as constituem, começando: na parte inferior com a camada de suporte da cobertura, de seguida uma camada de impermeabilização, depois a camada que serve de drenagem e barreira anti raízes, por cima, um filtro, posteriormente o substrato e por fim a vegetação. Na figura 3, é possível visualizar as diferentes camadas existente numa cobertura verde.



Figura 3: Componentes de uma cobertura verde. (Fonte: Stahlhöfer & Pereira, 2013).

2.3.1 Suporte

O suporte é a componente que tem como principal objetivo sustentar todo o sistema, sendo constituído por lajes e restantes elementos estruturais. O seu dimensionamento deve ter em consideração o peso de todo o sistema, dependendo este, do tipo de cobertura verde e do tipo de utilização (Carvalho, 2017). Também no seu dimensionamento se deverá considerar casos extremos, como por exemplo, uma chuvada em que o solo fica saturado, havendo com isto, uma enorme variação do seu peso (Bernardino, 2018).

2.3.2 Camada de Impermeabilização

Devido à capacidade de uma cobertura verde em reter a água, esta camada torna-se bastante importante, pois impede que a água atinja a camada de suporte evitando as indesejáveis infiltrações e possíveis penetrações das raízes da vegetação principalmente para coberturas do tipo intensivas.

Segundo (Vijayaraghavan, 2016) existem vários tipos de membranas de impermeabilização disponíveis no mercado, tais como, membranas de aplicação líquida, membranas de PVC e membranas de folha única camada ou betume, figuras 4.

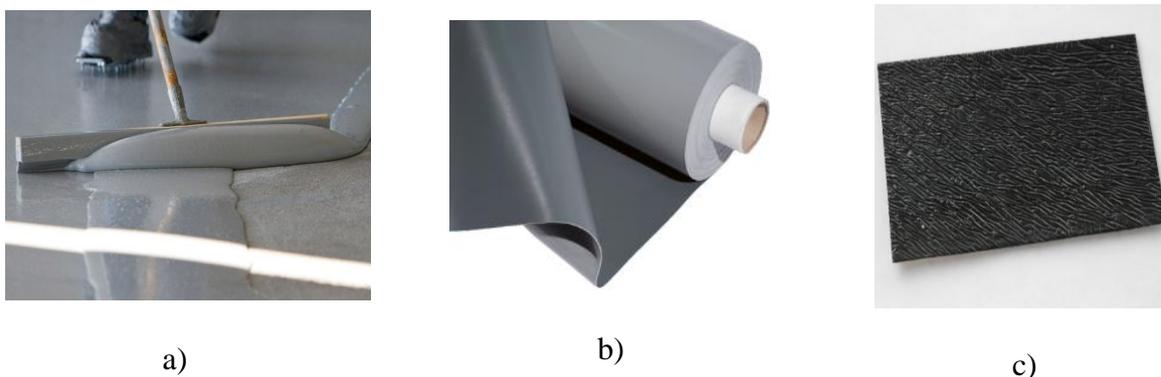


Figura 4: Sistemas de impermeabilização: a) Sistemas de impermeabilização líquida; b) membrana de PVC; c) membrana de impermeabilização (Fonte: mastehousesoluções, Ifambiental, dywaterproofing, 2019).

2.3.3 Camada Drenagem

A camada de drenagem tem a capacidade de libertar o excesso de água retida no substrato de forma gradual por escorrência ou por evaporação e transpiração, contribuindo, para um equilíbrio ideal de água e ar numa cobertura.

A escolha dos materiais utilizados para esta camada tem em conta diferentes variáveis, como o custo, requisitos de construção, a dimensão e o tipo de cobertura. De acordo com Vijayaraghavan (2016), os painéis modulares de drenagem e materiais granulares de drenagem, são os principais tipos de materiais utilizados para a camada de drenagem. Os painéis são constituídos por polietileno ou poliestireno e dispõem de várias cavidades para armazenar água durante os períodos de seca, e possui perfurações ao longo do painel permitindo a drenagem rápida do excesso de água durante os períodos de chuva (figura 5). Os materiais granulares normalmente utilizados são: agregados de argila expandida, xisto expandido, tijolo triturado, cascalho grosso e lascas de pedra. Estes materiais, contêm grandes poros, de maneira, a conseguir armazenar água, como mostra a figura 5.



Figura 5: Sistemas de drenagem. a) Manta drenante em poliestireno; b) Argila expandida. (Fonte: a) agricult, 2019; b) leca, 2019).

2.3.4 Camada Filtrante

A camada filtrante, separa a manta drenante da camada de substrato. Tem como principal e único princípio proteger a camada drenante de possíveis entupimentos de sedimentos finos, devido ao escoamento da água (Santos, 2012). Para isso, os materiais utilizados têm de conter características resistentes às ações mecânicas das raízes e, em simultâneo, apresentar elevada permeabilidade à água. Normalmente, nesta camada são usadas telas geotêxteis, conforme ilustra a figura 6.



Figura 6: Exemplo do material usado na camada filtrante, Tela Geotêxtil. (Fonte: archiexpo, 2019).

2.3.5 Substrato

O substrato é uma das camadas em que se requer mais cuidado no dimensionamento de uma cobertura verde. As suas funções principais consistem em ser o meio de desenvolvimento da vegetação e terem que assegurar capacidade de retenção de água (Carvalho, 2017).

Substrato técnico é outra designação encontrada na literatura para definir o material que constitui esta camada, e caracteriza-se pelo seu elevado teor em materiais porosos e baixo teor em matéria orgânica. A sua espessura e o tipo de vegetação definem o tipo cobertura: extensiva, semi-intensiva ou intensiva.

A escolha dos materiais da camada do substrato é fundamental, uma vez que é a camada que contribui com a maior carga para a estrutura e tem influência direta na escolha do tipo de vegetação. Além disso interfere no desempenho geral das coberturas, já que a maioria dos benefícios, como por exemplo, a retenção e capacidade de drenagem das águas pluviais, desempenho térmico e o desempenho acústico estão diretamente relacionados com esta camada.

De modo a conseguir a maior eficiência do sistema é necessário que a escolha dos materiais que o constituem sejam acertadas. De acordo com as FLL (2002), na escolha do substrato, é necessário ter em conta os seguintes parâmetros: compatibilidade com as plantas a serem

utilizadas, conteúdo em matéria orgânica, permeabilidade à água e sua capacidade de retenção, entre outros.

D.B. Rowe & Getter (2006) consideram que um substrato é ideal quando o seu peso é reduzido, quando tem uma boa capacidade de retenção de água e de nutrientes, quando é bom drenante e se não decompuser com o passar do tempo. Os substratos são normalmente compostos por: solo natural, areia, xisto ardósia ou argila expandida, *diatomaceous earth*, isolite, perlite e vermiculite, zeolite, poliestireno expandido.

Além disso, em consequência da enorme atividade do setor da construção, a grande percentagem dos resíduos gerados em Portugal, assim como, nos restantes estados membros da União Europeia são derivados deste setor, e designam-se por Resíduos de Construção e Demolição (RCD) (APA, 2019). Nos últimos anos tem-se vindo a recorrer a este tipo de resíduos para a produção de substratos, de modo a torná-los mais sustentáveis.

2.3.6 Camada Vegetação

Por último, à superfície, encontra-se a camada que dá vida à cobertura: a vegetação. São inúmeros os benefícios desta camada, como por exemplo a regulação da temperatura do ar, o arrefecimento do substrato e retenção do azoto (Thuring & Dunnett, 2019). A escolha da vegetação numa cobertura verde depende do tipo de cobertura (extensiva, semi-intensiva ou intensiva), das condições climáticas e microclimáticas do local, nível de manutenção e da sua finalidade. As plantas de género *Sedum*, são as mais comuns em coberturas extensivas, devido à sua baixa necessidade manutenção (Marau Gonçalves, 2017).

2.3 Tipos de Coberturas Verdes

As coberturas verdes encontram-se divididas em 3 categorias: coberturas verdes intensivas, semi-intensivas e extensivas, conforme ilustra a figura 7. Na escolha do tipo de cobertura verde é necessário ter em conta vários aspetos, nomeadamente o tipo de vegetação, a profundidade do substrato, a manutenção exigida, a necessidade de irrigação e a acessibilidade.

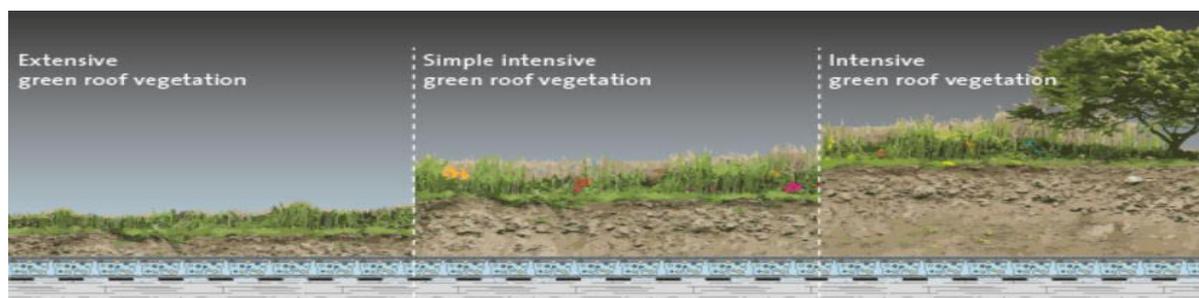


Figura 7: Diferentes tipos de coberturas ajardinadas. (Fonte: resitrix, 2019).

2.3.1 Coberturas Verdes Extensivas

As coberturas verdes extensivas são caracterizadas pela sua reduzida altura do substrato, pouco peso de construção, uso de vegetação com pouca exigência de manutenção, sendo a figura 8 um exemplo deste tipo de cobertura.

O peso destes sistemas é aproximadamente 120 - 150kg/m² (Mannheim, 2019), que resultam dos valores diminutos da espessura do substrato que rondam os 50 e os 150mm (LECA - Saint Gobain, 2017). Para este tipo de cobertura verde a vegetação aplicada inclui espécies do género *Sedum*, herbáceas e alguns tipos de gramíneas que para além de necessitarem de pouco substrato têm a capacidade de resistir às condições naturais que normalmente nela incide (chuva, vento, sol, seca). Para além disso são autorregeneradoras e pouco exigentes.

As coberturas verdes extensivas não são acessíveis a não ser para fins de manutenção. Visto que o fornecimento de água e nutrientes é sobretudo através de processos naturais, a sua manutenção consiste em duas ou três visitas por ano para remoção de eventuais espécies invasoras e para controle de segurança, do sistema de drenagem e impermeabilização.



Figura 8: Cobertura extensiva. (fonte: Zinco, 2019).

2.3.2 Coberturas Verdes Intensivas

As coberturas verdes intensivas são habitualmente definidas como jardins na cobertura, devido à sua semelhança com um jardim convencional (Shimming, 2012). São caracterizadas sobretudo pelo seu peso, sendo este superior a 150kg/m² resultante da altura da camada de substrato, que ultrapassa os 150mm e do tipo de vegetação, conforme ilustra a figura 9.

Por conter uma camada de substrato com maior espessura, a escolha de vegetação é variada e pode ser acessível. Neste tipo de cobertura, como são ideais para espaços de lazer, são normalmente constituídas por relvados, culturas plurianuais, arbustos e árvores. Relativamente à manutenção necessária, nas coberturas intensivas, é elevada, mais exigente e mais específica.

Graças ao desenvolvimento de um ecossistema mais complexo, é necessário adubações, corte de relva e rega com regularidade (LECA - Saint Gobain, 2017).



Figura 9: Cobertura Intensiva. (Fonte: Zinco, 2019).

2.3.3 Coberturas Verdes Semi-Intensivas

As coberturas verdes semi-intensivas são uma combinação entre as coberturas verdes extensivas e as intensivas. De acordo com a ANCV (Associação Nacional de Coberturas Verdes), as coberturas semi-intensivas apresentam uma vegetação semelhante às coberturas verdes intensivas, sendo constituídas na maior parte dos casos por plantas herbáceas, subarbustivas e arbustivas (figura 10).

A manutenção neste tipo de cobertura é inferior, comparando com uma cobertura verde intensiva, assim como a espessura de substrato (100 – 200mm) (Neoturf, 2019; Mahdiyar et al., 2018).



Figura 10: Cobertura Semi-Intensiva. (Fonte: Zinco, 2019).

2.3.4 Comparação da Coberturas verdes Extensivas, Semi-Intensivas e Intensivas

As diferenças entre os três tipos de coberturas passam desde o tipo de vegetação, altura da camada do substrato, peso, custos, acessibilidade e manutenção. A tabela 1 faz uma comparação destas características entre cada tipo de cobertura.

Tabela 1: Classificação dos telhados verdes consoante os fatores de construção, manutenção e acessibilidade. (Adaptado de *Raji, Tenpierik, & Van Den Dobbelsteen, 2015*).



Manutenção	Baixa	Periódica	Alta
Rega	Não necessita	Periódica	Regular
Vegetação	Musgo - Sedum, ervas e relva	Relva, ervas e arbustos	Relva ou plantas perenes, arbustos e árvores
Altura do sistema construtivo	60 – 200mm	120 – 250mm	150 – 400mm, para garagens subterrâneas >1000mm
Peso	60 – 150kg/m ²	120 – 200kg/m ²	180 -500kg/m ²
Custos	Baixo	Médio	Alto
Acessibilidade ao público	Não acessível	Acessível	Muito acessível

2.4 Benefícios das coberturas verdes

Nos dias que correm, a implementação das coberturas verdes é cada vez mais comum nas grandes áreas urbanas. Esta implementação é motivada pela oferta de um vasto conjunto de benefícios tanto a nível económico, como a nível ambiental e social. No que diz respeito aos benefícios económicos destacam-se:

- Aumento da retenção de água;
- Redução dos custos com a manutenção dos edifícios;
- Aumento do desempenho energético;
- Criação de um novo espaço útil.

Relativamente aos benefícios ambientais sobressaem os seguintes:

- Retenção de água;
- Melhoria o microclima;
- Retenção de partículas de poeira tóxicas;
- Proteção contra o ruído;
- Oferta de um habitat natural.

2.4.1 Benefícios Económicos

2.4.1.1 Retenção de água

A expansão das áreas urbanas origina a construção de novas infraestruturas como estradas, parques de estacionamento e edifícios, conduzindo ao aumento de áreas impermeáveis nas cidades (Carbone, Garofalo, & Piro, 2014).

De modo a mitigar esse problema, as coberturas verdes oferecem às cidades novas áreas permeáveis, possibilitando assim, uma zona de armazenamento adicional para as águas pluviais (Lin & Lin, 2011).

Berardi et al. (2014) mencionam vários estudos realizados referentes à capacidade destas coberturas em reter água. Esses estudos mostraram que poderá haver uma redução do escoamento superficial de entre os 25% e os 60% para coberturas extensivas e entre os 50% e os 100% para coberturas intensivas. Esta redução de escoamento superficial permitirá uma redução da capacidade da saída de água através dos tubos de quedas e esgotos poderá ser diminuída, reduzindo consequentemente os custos de construção.

2.4.1.2 Custos com a manutenção dos edifícios

A vegetação e o substrato das coberturas verdes protegem o sistema de impermeabilização contra as agressões naturais, nomeadamente as flutuações extremas de temperatura, raios ultravioleta e danos mecânicos. Deste modo, a esperança de vida do sistema de impermeabilização conduz a uma diminuição dos custos de manutenção.

Um exemplo disso é o edifício *Derry and Toms* construído em 1938 na cidade de Londres, que permanece em excelentes condições e mantém o sistema de impermeabilização de origem (Steven W. Peck & Callaghan, 1999).

Em Portugal, a utilização das coberturas verdes, têm um enorme proveito, sendo que existem grandes flutuações de temperatura entre a estação de inverno e verão, conforme se vê na tabela 2.

Tabela 2: Valores Extremos da Temperatura em Portugal para o ano 2018. (Adaptado de: IMPA, 2019).

Valores Extremos – Ano 2018	
Temperatura mínima	-8,6 °C em Lamas de Mouro, dia 24 de fevereiro
Temperatura máxima	46,8 °C em Alvega, dia 4 de agosto

2.4.1.3 Desempenho energético

Um dos principais benefícios destas coberturas para os edifícios é a redução de consumos de energia associados à climatização, graças à melhoria da eficiência energética do edifício. Este benefício vai ser função das características das soluções construtivas, uma vez que os edifícios que não têm isolamento térmico, o impacto das coberturas verdes será mais visível do que no caso dos edifícios que possuem isolamento (Hashemi, Mahmud, & Ashraf, 2015).

No verão, a radiação incidente nas superfícies dos telhados é elevada. Por exemplo, segundo Ouldboukhitine et al. (2012) foi registada uma temperatura de 90°C num telhado convencional, na Austrália. Neste sentido, as coberturas verdes têm a capacidade de atenuar essas temperaturas extremas através do sombreamento da vegetação, da resistência do substrato e do efeito de evapotranspiração das plantas, conseguindo reduzir as transferências de energia pela cobertura e melhorando o nível de conforto térmico no interior do edifício (S. Ouldboukhitine & Djedjig, 2012).

Steven W. Peck & Callaghan (1999) mostraram que estas coberturas reduzem 90% da ação térmica dos raios incidentes e que quando as temperaturas exteriores atingem valores entre os 25 e 30°C estas coberturas conseguem diminuir as temperaturas entre 3 a 4°C no interior do edifício.

2.4.1.4 Criação de um novo espaço útil

Para habitações que não dispõem de um espaço exterior, as coberturas verdes oferecem um espaço útil adicional e privado para diversas utilizações. Este facto constitui um benefício económico já que valoriza o imóvel. Também poderá ser visto como um benefício social, visto que poderá ser utilizado como espaço de lazer e descanso ou um espaço de recreio para as crianças.

2.4.2 Benefícios Ambientais

2.4.2.1 Retenção de água

Para além da retenção de água ser um benefício económico, como foi referido anteriormente no capítulo 2.4.1.1., é possível ser considerado também uma vantagem a nível ambiental, na medida que evita que os poluentes presentes nas águas pluviais escoem, ficando retidos na camada de substrato, melhorando, desta forma, a qualidade das águas pluviais (Marau Gonçalves, 2017).

(Vijayaraghavan & Raja, 2014) prepararam um telhado verde com materiais sustentáveis, como tijolo triturado, turfa de coco, areia, algas marinhas, entre outros e simularam uma chuvada com água contaminada com vários tipos metais pesados. Os autores concluíram que o sistema desempenhou bem o papel na retenção de iões de metais pesadas como, Cu, Cr, Cd, Ni, Pb, Zn, Al e Fe, conseguindo melhorar a qualidade da água.

2.4.2.2 Melhoria do microclima

O crescimento da população urbana tem-se traduzido num aumento das áreas urbanas nas cidades. Esse aumento levou a que as áreas verdes fossem substituídas por soluções com características impermeáveis e com cores que retêm o calor levando à criação do efeito das ilhas de calor.

Segundo Peck, S. W., & Richie, J. (2009), o efeito da ilha de calor resulta no aumento da temperatura das cidades. Materiais usados nas áreas urbanas como por exemplo o betão e o asfalto são exemplo de soluções que contribuem para o efeito ilha de calor. Estes tipos de materiais absorvem, a energia do sol durante o dia, libertando-a durante a noite. A de libertação de calor devido ao elevado tráfego rodoviário, à má circulação de ar causada pela altura dos edifícios, e também à reduzida capacidade de dissipação da radiação infravermelha, faz com que a temperatura das cidades seja superior relativamente à temperatura das áreas rurais (Santamouris, 2014). Isto faz com que haja um maior consumo de eletricidade, proveniente do aumento do uso de ar condicionado, aumentando consequentemente a taxa de libertação de poluentes para o ar (H. Aziz, Z.Ismail, 2011).

A capacidade de um corpo em absorver radiação é traduzida pelo albedo. Na tabela 3 é possível observar valores de albedo consoante o tipo de material.

Tabela 3: Valores de albedo para os diferentes tipos de superfície. (Adaptado de (Costa, 2010).

Tipo de Superfície	Albedo
Relva	0,25 – 0,30
Árvores	0,15 – 0,18
Água	1
Cascalho	0,8 – 0,18
Asfalto	0,05 – 0,20
Alcatrão e Gravelha	0,08 – 0,18
Tijolo – Pedra	0,20 – 0,50
Betão	0,10 – 0,35
Cerâmica	0,10 – 0,35
Pintura branca	0,50 – 0,90
Pintura Preta	0,02 – 0,15

De acordo com Giordano, Krüger, & Erell (2014), os materiais com valores de albedo altos são benéficos para mitigar a ilha de calor, dado que contêm uma maior capacidade de refletir a radiação incidente, mantendo a temperatura das superfícies dos materiais mais baixas.

As coberturas verdes são utilizadas como uma medida de mitigação deste problema, na medida em que são capazes de diminuir a temperatura do ar e aumentam o índice de humidade através da evapotranspiração. Por outro lado, este tipo de cobertura utiliza materiais com valores de albedo superiores aos materiais utilizados nas coberturas convencionais. QIU et al. (2013) afirmam que a evapotranspiração tem a capacidade de reduzir a temperatura urbana até 0.5°C.

Susca, Gaffin, & Dell’Osso (2011), de modo a analisar o efeito de ilha de calor em quatro áreas da cidade de Nova York, compararam as temperaturas do ar registadas no centro da cidade (*Columbia University*) e numa área arborizada (*Fieldston*), onde detetaram uma diferença média de 2 °C. Essa diferença foi justificada pela presença de vegetação da área arborizada. Essa diferença é também devida à dificuldade de dispersão do ar no centro da cidade causado pelas dimensões dos edifícios.

2.4.2.3 Retenção de partículas

Um dos problemas dos grandes centros urbanos é a poluição do ar que geralmente apresenta elevados níveis de partículas, consideradas nocivas não só para a saúde humana, mas também para o meio ambiente.

O uso de coberturas verdes nos centros urbanos atenua o problema, pois estas conseguem filtrar as partículas poluentes presentes no ar. A capacidade que as plantas possuem em reduzir a concentração dos poluentes existentes no ar, provêm de dois tipos de processos: diretos e indiretos. Processo direto, na medida em que as plantas absorvem os poluentes existentes no ar, através dos seus estomas. Processo indireto, uma vez que conseguem alterar o microclima no meio urbano (Vijayaraghavan, 2016).

D. Bradley Rowe (2011) afirma que um metro quadrado de cobertura verde atenua as partículas emitidas anualmente por um carro.

2.4.2.4 Proteção contra o ruído

Um tipo de poluição recorrente nas cidades é a poluição sonora, causada, sobretudo pelo ruído do tráfego rodoviário, ferroviário e aéreo.

Um dos contributos positivos das coberturas ajardinadas é a capacidade de atenuar esse ruído, essencialmente pela absorção das ondas sonoras que difratam sobre as coberturas através da vegetação existente (Vijayaraghavan, 2016).

São poucos os estudos realizados em relação ao benefício acústico. Connelly & Hodgson (2013) realizaram um estudo onde analisaram a influência da camada de substrato, o teor de água e a presença da vegetação na propagação do ruído nas coberturas verdes. Os autores concluíram que havia uma maior absorção, de 10 e 20dB nas faixas de frequências baixa e média, respetivamente, para coberturas onde a vegetação estava presente.

Também H. Aziz, Z.Ismail (2011) afirmam que somente 12cm de meio de cultivo podem reduzir o som até 40dB.

Galbrun & Scerri (2017) verificaram que aumentando a camada de substrato o desempenho acústico melhora, mas que poderá não ser justificado por se tratar de uma cobertura verde extensiva. Fabiani et al. (2018) concluíram, também, que substratos com menor teor de humidade relativa, apresentam melhor desempenho acústico.

2.4.2.5 Oferta de um habitat natural

Como já foi referido anteriormente, o elevado desenvolvimento urbano levou a que áreas verdes fossem substituídas por edifícios e estradas, destruindo habitats e consequentemente diminuindo a biodiversidade.

As coberturas verdes conseguem, de certa forma, proporcionar uma conexão ao meio rural, oferecendo um novo habitat para uma extensa variedade de seres vivos. Oberndorfer et al., (2007) afirmam que vários investigadores realizaram estudos em vários países com o objetivo de perceber que tipo de seres vivos habitavam nas coberturas verdes. Esses estudos concluíram que comunidades de invertebrados, desde besouros, formigas, moscas, abelhas, aranhas e cigarras, mas também aves habitam neste tipo de cobertura.

Na Suíça e no Reino Unido, estas pesquisas levaram a que várias organizações de conservação, locais e nacionais, promovessem o habitat nas coberturas verdes (Oberndorfer et al., 2007).

2.5 Custos e Incentivos

2.5.1 Custos relativos à construção de uma cobertura verde

Não existem preços padrão para as coberturas verdes, no entanto apresenta-se em anexo duas tabelas, Anexo A e Anexo B, referentes a coberturas verdes extensivas e intensivas, respetivamente. Nelas é possível observar a gama de custos inerentes à construção para cada tipo de cobertura e os fatores fundamentais que estabelecem esses custos. Os custos assumem que o edifício possui capacidade para a carga existente e que o seu acesso ao telhado é unicamente por escada (H. Aziz, Z.Ismail, 2011)

De acordo com Mahdiyar et al. (2016), uma pesquisa realizada no Canadá concluiu que a instalação de uma cobertura verde extensiva é aproximadamente 96,89€/m² e 110,47€/m², para coberturas com plantas individuais e plantas do género *Sedum* pré plantadas, respetivamente. Já no Reino Unido, os custos de instalação de uma cobertura verde é cerca de 50,72€/m² e 182,94€/m². Em relação aos custos de instalação deste tipo de coberturas em países asiáticos, por exemplo, em Hong Kong, o valor ronda 57,96€/m², já na China os valores são mais reduzidos e rondam os 25€/m² (Mahdiyar et al., 2016).

Em Portugal, os custos associados à instalação de uma cobertura verde extensivas estão entre 40 e 70 €/m². Quanto à instalação de coberturas intensivas os custos estão entre 80 e 150 €/m² (ANCV Green Roofs, 2019).

2.5.2 Incentivos às coberturas verdes

Alguns governos ao reconhecerem os benefícios das coberturas verdes têm criado diferentes formas de incentivos de aplicação deste tipo de solução usual nos centros urbanos. Estes incentivos podem ser financeiros diretos, financeiros indiretos, estratégias que visam a proteção do meio ambiente e a regulamentação do ordenamento urbano e da construção de edifícios (Marau Gonçalves, 2017).

Um exemplo de incentivo financeiro direto é o caso de Portland, que no seu código de construção, refere que na instalação de 0.09m² de cobertura verde, o promotor receberá um espaço adicional de 0.27m² (Pinto, 2014). Também na cidade de Berlim, na Alemanha, foi criado um programa (*The Courtyard Greening Program*) que impulsionou o número de instalações de coberturas na cidade, pois este programa reembolsava os residentes em metade dos custos de instalação de coberturas verdes extensivas (Marau Gonçalves, 2017).

Reconhecendo os benefícios que as coberturas verdes podem oferecer às cidades, alguns governos na América do Norte reduzem as tarifas de água e esgoto aos proprietários das habitações que possuem este tipo de coberturas, sendo este incentivo considerado indireto (H. Aziz, Z.Ismail,2011).

Com o intuito de combater o efeito de ilha de calor, no interior da cidade de Toronto, o governo aprovou uma lei, em 2009, que exigia a construção de coberturas verdes em 20% a 60% da área disponível do telhado, para todos os novos edifícios com uma área bruta igual ou superior a 2000m² (Rinner & Hussain, 2011). Também na cidade de Tóquio, no Japão, com o mesmo propósito de mitigar o efeito da ilha de calor na cidade, obriga a edifícios particulares com mais de 1000 m² e edifícios públicos com mais de 250m², a que 20% das suas coberturas sejam verdes (Vijayaraghavan, 2016). Em 2010, a cidade de Copenhaga, na Dinamarca, obrigou a instalação de coberturas ajardinadas em todos os novos edifícios, cuja cobertura usufruísse de uma inclinação inferior a 30° (Goyena, 2019).

Em Portugal, os incentivos no que diz respeito às coberturas verdes surgiu a nível municipal. Devido à aprovação da integração de incentivos no atual Regulamento Municipal de Concessão de Incentivos ao Investimento, a cidade do Barreiro é a primeira cidade da península ibérica com apoio à implementação de coberturas verdes (Barreiro, 2019)

Segundo o Regulamento Municipal de Concessão de Incentivos ao Investimento, deliberação nº 712/2019, capítulo I, artigo 7.º (Critérios para a Concessão de Incentivos ao Investimento):

“3 - Os projetos de investimento associados a operações urbanísticas que se concretizam em obras de construção nova, e em obras de reabilitação do edificado, no mínimo, deverão obter pontuação cumulativa nas alíneas a) e c), do n.º 1 do presente artigo, e considerar a utilização das práticas ambientalmente e energeticamente sustentáveis que se identificam de seguida, sob pena de exclusão:

a) Privilegiar o uso eficiente de energia

1) Maior utilização de medidas solares passivas - ex: adequar o edifício ao clima (ventos dominantes, humidade, orientação solar), orientar os edifícios a sul integrando palas,

*beirados, estores e persianas que sombreiam este alçado no Verão e permita captar o sol no Inverno, sistemas de aquecimento passivo, como as paredes de "Trombe", sistemas de arrefecimento passivo (sistema de arrefecimento pelo solo), privilegiar as **coberturas ajardinadas**, ventilação e iluminação natural, para além das abordagens mais correntes, como colocação de vidros duplos, isolamento térmico (ex. cortiça) nas fachadas e coberturas, isolamento das fundações;"*

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição dos substratos

No presente capítulo descrevem-se os procedimentos de ensaio que foram sistematizados com vista à caracterização de substratos técnicos. Este trabalho incidiu em propriedades com reflexo no comportamento higrotérmico (tais como a condutibilidade térmica, a emissividade, o albedo, a permeabilidade ao vapor de água) e no comportamento hídrico (tais como capacidade de drenagem e de retenção). Também se descreveram os procedimentos para um ensaio em câmara bioclimática, através do qual se pretende avaliar o comportamento global de soluções de cobertura verde completas em condições próximas das reais. Sempre que possível, os ensaios realizados contemplaram a caracterização de um alargado número de composições, cujas diferenças residem nos resíduos que incorporam. Na figura 11 estão ilustradas as amostras dos substratos caracterizados.



Figura 11: Substratos a serem caracterizados.

A campanha experimental decorreu no Itecons - Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade.

Os substratos utilizados foram desenvolvidos no âmbito do projeto EcoGreenRoof, substituindo alguns constituintes tradicionais, tais como rochas vulcânicas, argila expandida e turfas por novas matérias-primas resultantes do processamento de resíduos. Os resíduos inorgânicos tiveram como origem a atividade de indústrias do setor da cerâmica e da fundição. A componente orgânica, por sua vez, foi obtida por compostagem de resíduos sólidos urbanos. Apresenta-se, na Figura 12, um esquema ilustrativo das etapas de transformação dos resíduos até à sua incorporação nos substratos finais.

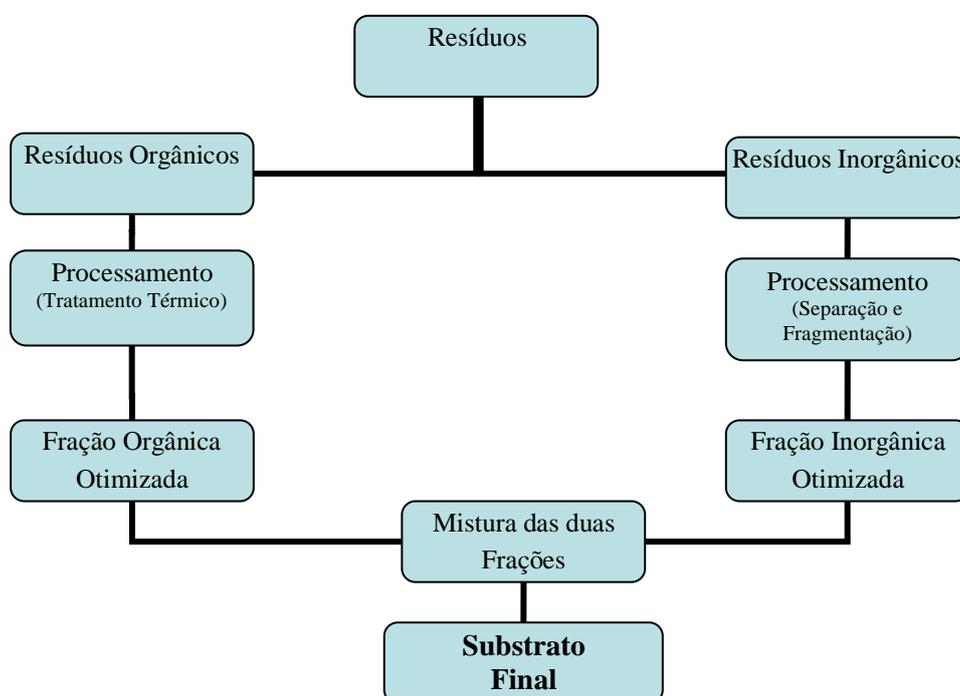


Figura 12:Esquema ilustrativo das etapas de transformação dos resíduos até à sua incorporação nos substratos finais.

3.2 Condutibilidade Térmica

3.2.1 Princípio

A condutibilidade térmica é a propriedade que quantifica o calor em Watts (W) que atravessa um determinado corpo de 1m de espessura e uma área de 1 m² quando existe uma diferença de temperatura de 1°C. Para que um material seja bom isolante térmico, o coeficiente de condutibilidade tem de ser baixo, pois este coeficiente traduz a facilidade de transferência de

calor da superfície mais quente para a mais fria. Na determinação deste parâmetro aplica-se a Lei de Fourier.

O princípio deste ensaio baseia-se na medição de fluxo de calor que atravessa uma amostra localizada entre dois pratos com diferentes temperaturas.

3.2.2 Condicionamento das amostras

Para estudar este parâmetro, realizaram-se quatro ensaios para cada substrato, variando o teor em água, de modo a compreender o comportamento térmico em função da presença da água. Para isso, impuseram-se as quatro condições indicadas na tabela seguinte. Na tabela 4 estão sumariadas as informações referentes às condições do provete e aos equipamentos utilizados no condicionamento das amostras e na realização do ensaio. O ensaio foi realizado de acordo com as orientações das normas NP ISO 12667:2012 e EN 12664:2001.

Tabela 4: Condições e equipamentos utilizados na realização dos ensaios de condutibilidade térmica.

Ensaio	Condições do provete	Aparelho utilizado para o Condicionamento	Aparelho utilizado no ensaio
1	Seco	Estufa (60°C)	HFM 436 Lambda
2	23°C/50% HR	Câmara Climática	HFM 436 Lambda
3	23°C/80% HR	Câmara Climática	HFM 436 Lambda
4	Saturado	-	λ-Meter EP500e

Na figura 13 apresentam-se, ainda, registos fotográficos dos equipamentos utilizados.



a)

b)

Figura 13: Aparelhos utilizados nos ensaios. a) HFM 436 Lambda; b) λ-Meter EP500e.

3.2.3 Procedimento do ensaio da condutibilidade dos substratos a seco

Inicialmente, caracterizaram-se os substratos na condição a seco. Para isso, as amostras foram submetidas a um período de secagem, de 13 a 20 dias, dependendo do substrato em estufa a 60°C e foram realizadas pesagens diárias até atingirem massa constante.

Posteriormente, as amostras foram acondicionadas devidamente numa moldura em EPS. O provete tem (300x300x26)mm e a área de medição (152x152x26)mm, como mostra a figura 14.

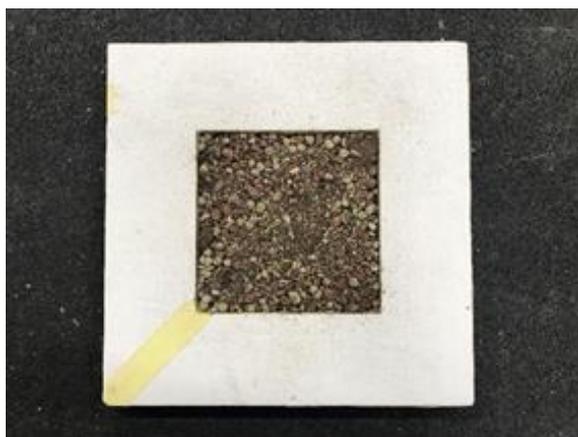


Figura 14: Provete utilizado para a realização dos ensaios da condutibilidade.

Antes da amostra ser introduzida no aparelho HFM 436 Lambda fez-se uma pesagem. O aparelho foi programado para obter o coeficiente de condutibilidade para três temperaturas: 10°C, 25°C e 40°C. No fim do ensaio, fez-se uma nova pesagem de modo a controlar a variação

da massa durante o ensaio. Na tabela 5 são apresentados os dados referentes a cada provete antes e após o ensaio.

Tabela 5: Dados referentes a cada provete à condição a seco, antes e após a realização do ensaio.

Amostra	Massa inicial (g)	Massa após ensaio (g)	Massa Volúmica aparente (kg/m³)
SR01	304,57	304,53	506,47
SR02	280,76	280,88	466,87
S03	315,58	315,5	524,77
S04	345,33	345,25	573,75
S05	285,65	285,75	475,00
S06	296,93	296,89	493,76
S07	287,64	287,74	478,31
S08	303,44	303,36	504,59
S09	288,43	288,70	479,63
S10	264,89	265,15	440,48
S11	377,28	377,66	627,37
S12	374,94	375,34	623,48
S13	349,33	349,68	580,90
S14	349,98	350,04	581,89
S15	448,08	448,17	745,11

3.2.4 Procedimento do ensaio da condutibilidade dos substratos a 23°C/50%HR

Com o objetivo de realizar o ensaio a 23°C e 50% de humidade relativa seguiu-se o mesmo procedimento do ensaio anterior. Neste caso, as amostras foram condicionadas numa câmara climática à temperatura de 23°C e 50% de humidade relativa. O provete e o aparelho utilizados na realização neste ensaio foram os mesmos do ensaio anterior. A tabela 6, apresenta a informação referente a cada amostra antes e depois do ensaio, assim como a massa volúmica.

Tabela 6: Dados referentes a cada provete às condições 23°C/50%HR, antes e após a realização do ensaio.

Amostra	Massa inicial (g)	Massa após ensaio (g)	Massa Volúmica aparente (kg/m³)
SR01	320,40	320,20	529,30
SR02	315,30	315,70	517,50
S03	341,40	341,20	550,50
S04	400,00	400,00	639,10
S05	303,00	302,90	497,10

S06	275,30	275,90	456,09
S07	317,70	317,30	516,30
S08	305,50	305,70	508,00
S09	280,00	280,20	466,20
S10	280,00	280,30	466,42
S11	330,00	330,27	550,20
S12	382,45	382,60	635,40
S13	384,11	384,30	627,51
S14	350,10	350,38	568,30
S15	440,59	440,93	727,20

3.2.5 Procedimento do ensaio da condutibilidade dos substratos a 23°C/80%HR

De igual modo realizou-se o ensaio para as condições a 23°C e 80% de humidade relativa. Neste ensaio, foram utilizadas as mesmas amostras de substrato que foram condicionadas na câmara climática às condições de 23°C e 80% de humidade relativa. Na tabela seguinte estão disponíveis os dados referentes de cada provete para as condições definidas.

Tabela 7: Dados referentes a cada provete às condições 23°C/80%HR, antes e após a realização do ensaio.

Amostra	Massa inicial (g)	Massa após ensaio (g)	Massa Volúmica aparente (kg/m³)
SR01	314,89	314,68	519,10
SR02	305,34	305,03	500,13
S03	333,20	333,00	540,30
S04	374,42	374,31	616,00
S05	280,47	280,45	463,30
S06	289,02	288,96	468,89
S07	305,30	305,35	499,50
S08	295,47	295,33	489,54
S09	278,20	278,06	461,80
S10	251,12	250,92	418,30
S11	342,85	342,75	566,60
S12	342,85	342,75	654,60
S13	380,70	380,75	614,30
S14	350,90	350,70	573,70
S15	446,00	446,31	731,30

3.2.6 Procedimento do ensaio da condutibilidade dos substratos saturados

Por último, foi estudado o comportamento térmico do substrato quando este está saturado. Para este ensaio as amostras foram previamente saturadas e deixadas a escoar durante alguns minutos. Após atingir a saturação as amostras foram ensaiadas repetindo-se o procedimento utilizado anteriormente. Para este ensaio utilizou-se o λ -Meter EP500e.

Tabela 8: Dados referentes a cada provete à condição saturado, antes e após a realização do ensaio.

Amostra	Massa do provete saturado (g)	Massa após ensaio (g)	Massa Volúmica aparente (kg/m ³)
SR01	478,10	475,90	694,57
SR02	465,40	462,10	459,60
S03	537,40	535,40	783,30
S04	651,10	646,00	947,50
S05	489,70	487,50	712,60
S06	493,20	491,00	717,70
S07	521,50	519,70	758,90
S08	500,00	496,40	726,60
S09	503,40	502,80	733,80
S10	450,00	448,10	656,10
S11	531,30	530,30	776,50
S12	571,40	571,00	830,40
S13	563,00	562,80	819,30
S14	520,00	519,50	758,50
S15	651,00	646,00	948,90

3.3 Emissividade

3.3.1 Princípio

A emissividade quantifica a capacidade que um corpo tem para emitir energia em forma de radiação eletromagnética. Segundo Stefan Boltzmann, a energia emitida por um corpo é proporcional à quarta potência da temperatura e é dada pela seguinte expressão:

$$P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Onde, T é a temperatura (K), ε a emissividade e σ a constante de Stefan Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$). De acordo com as características de cada material, a emissividade é apresentada

num intervalo de valores entre 0 e 1, sendo que 0 é para um corpo pouco emissivo (corpo negro) e valores próximos de 1 para corpos muito emissivos (corpo branco).

3.3.2 Procedimento

Com o objetivo de estudar qual a influência do teor de água na emissividade, foram realizados quatro ensaios variando o teor de água nos substratos. As condições foram as mesmas utilizadas nos ensaios de condutibilidade térmica:

- Ensaio 1: a seco;
- Ensaio 2: 23°C e 50% de humidade relativa;
- Ensaio 3: 23°C e 80% de humidade relativa;
- Ensaio 4: amostras saturadas.

Para caracterizar a emissividade dos substratos, foi utilizado o medidor de emissividade térmica TIR 100-2, como se ilustra na figura 15. “A amostra é submetida à radiação térmica de um corpo a uma temperatura de aproximadamente de 100°C durante um período de tempo muito reduzido de medição (<5seg). A radiação emitida pela superfície da amostra é, por sua vez, enviada para uma superfície esférica de modo a obter uma iluminação homogênea completa da superfície de medição (permitindo a medição em superfícies rugosas). A medição da radiação térmica emitida pela amostra advém da comparação entre os valores obtidos para a amostra com os valores de referência previamente adquiridos para dois padrões calibrados com valores de referência conhecidos (0,011 para a superfície espelhada e 0,961 para a superfície preta rugosa)”. A figura 16 ilustra o esquema de funcionamento do aparelho.



Figura 15: Aparelho TIR, usado na determinação das emissividades.

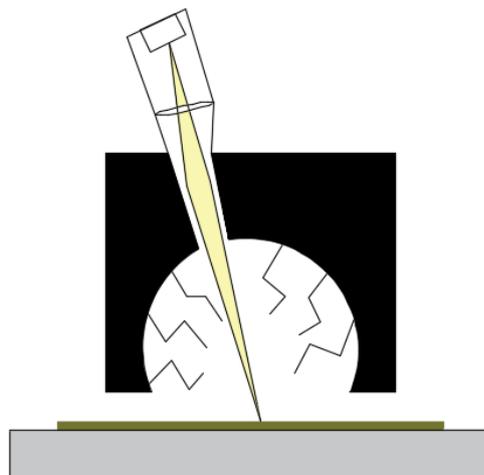


Figura 16: Esquema do funcionamento do aparelho TIR.

Os primeiros três ensaios foram realizados de igual modo com exceção do teor de água imposto na câmara climática.

3.3.3 Condicionamento dos substratos a seco, a 23°C/50%HR e a 23°C/80%HR

Visto que as amostras objeto de análise são substratos e que as mesmas não se conseguem manter na vertical, foi necessário rodar o aparelho de medição de forma a adaptar-se à posição do substrato, conforme se ilustra a figura 17 a). Construiu-se, para esse efeito, uma estrutura de suporte em madeira, figura 17 b). Com o objetivo de acomodar o substrato enquanto o ensaio é realizado, construiu-se um tabuleiro que permitisse retirar o substrato sem mover o aparelho.



a)



b)

Figura 17: Estrutura de suporte para o aparelho de medição TIR. a) Aparelho com estrutura de suporte; b) estrutura de suporte

Devido à heterogeneidade de cada substrato e de modo a adquirir um maior número de dados possível, foram realizadas três medições em diferentes pontos da amostra, para cada substrato. Após a primeira campanha de medições (3 por substrato), repetiu-se mais duas vezes o procedimento, ou seja, calibrou-se o aparelho e mediu-se novamente a emissividade, resultando num conjunto de nove resultados para cada amostra.

3.3.4 Condicionamento dos substratos saturados

Para a realização do ensaio nestas condições, foi necessário adicionar água aos substratos até atingir a saturação dos mesmos, deixando as amostras a escorrer previamente ao ensaio, de modo a libertar o excesso de água. A figura 18, mostra o tabuleiro preenchido com o substrato saturado.

O mesmo procedimento de calibração e medição descrito anteriormente foi repetido, obtendo-se 9 resultados de emissividade para cada amostra.



Figura 18: Amostra saturada e acomodada no provete para a realização do ensaio.

3.4 Albedo

3.4.1 Princípio

Como foi referido no Capítulo 2, um dos benefícios das coberturas verdes, é poder contribuir para a mitigação do efeito da ilha de calor no centro das cidades, onde há uma maior concentração de edifícios, áreas pavimentadas e fontes antrópicas de calor.

O albedo, também conhecido como coeficiente de reflexão, é definido através da razão entre a radiação refletida (E_r) numa dada superfície e a radiação incidente (E_i), sendo dado pela seguinte equação:

$$A = \frac{E_r}{E_i}$$

Os valores de albedo variam entre 0 e 1, sendo que quanto maior o valor de albedo, maior é a percentagem da radiação solar incidente que é refletida para a atmosfera, logo menor será a percentagem de energia convertida em calor e consequentemente menor será a temperatura da superfície.

O ensaio baseou-se na colocação de um substrato sob um albedómetro (Hukseflux Thermal Sensors). O albedómetro é um aparelho usado para análises meteorológicas gerais, físicas de edifícios, refletâncias em telhados e testes em coletores solares. Este aparelho é composto por dois piranómetros, um localizado na parte superior, para medir a radiação global, e o outro na parte inferior para medir a radiação refletida, conforme se pode ver na figura 19.



Figura 19: Aparelho utilizado na medição do albedo, Albedómetro. (Fonte: huksefluxbrasil, 2019).

O ensaio decorreu no Itecons, no local assinalado, como mostra a figura 20.

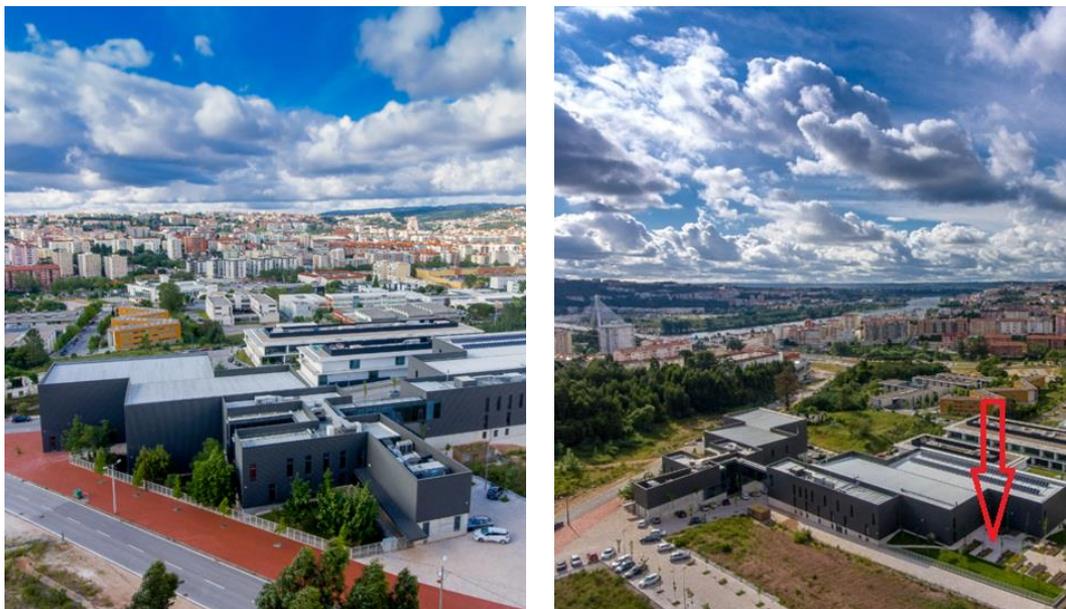


Figura 20:Localização do local de ensaio. Seta vermelho, ilustra a localização exata do ensaio. (Fonte: itecons.uc, 2019).

3.4.2 Procedimento do ensaio

Colocou-se um tabuleiro, com as dimensões $101 \times 101 \times 13 \text{ cm}^3$, sob o albedómetro existente (figura 21), no parque exterior do Itecons para que o ensaio decorresse em condições reais e com um alto fator de exposição para o céu.



Figura 21: Tabuleiro utilizado durante o ensaio e suas dimensões.

A preparação do provete consistiu no revestimento do tabuleiro com um plástico. De seguida e para que o plástico não impedisse a drenagem da água retida no substrato, fizeram-se vários cortes no plástico ao longo de todo o tabuleiro e colocou-se uma tela de drenagem por cima, como apresentado na figura 22-a). Finalmente, acrescentou-se o substrato de referência SR01,

como mostra a figura 22-b). Para se monitorizar a evolução da temperatura do substrato durante o ensaio, introduziu-se um termopar, conforme ilustra a figura 22-c).

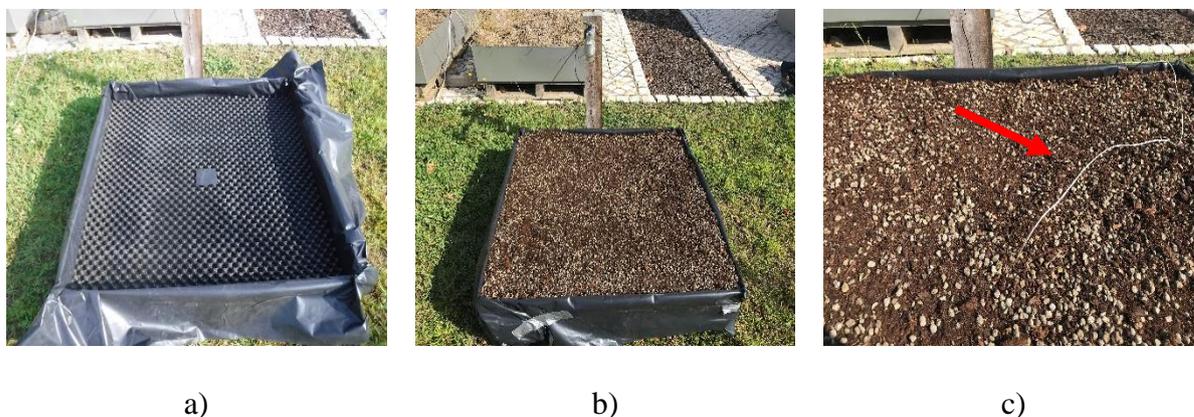


Figura 22: Montagem do provete: a) Revestimento com plástico e com a tela de drenagem; b) Preenchimento com substrato; c) Colocação do termopar.

O ensaio foi realizado durante três dias, de 9 a 11 de outubro de 2019, nos quais o céu se encontrou parcialmente limpo. Com o propósito de entender o comportamento do substrato com variação do teor de água, foram efetuadas cinco regas de duas em duas horas, começando às 10h e acabando às 18h. O albedómetro foi programado previamente, para que fossem feitas medições de dois em dois minutos.

Para efeito de comparação de resultados, colocou-se um tabuleiro com as mesmas dimensões coberto de vegetação, figura 23.



Figura 23: Tabuleiro com vegetação.

3.5 Drenagem e Retenção de Água

3.5.1 Princípio

Com o intuito de determinar o comportamento dos substratos em termos hídricos, foi estabelecido um protocolo de ensaio que permitisse avaliar a capacidade de drenagem e de retenção de água dos substratos. Por não haver qualquer tipo de guia técnico de referência para instalação e manutenção de coberturas verdes em Portugal, recorreu-se ao *FLL Guideline* (FLL, 2002) para estabelecer o procedimento.

O princípio do ensaio consiste na descarga de um determinado volume de água sobre um tabuleiro contendo substrato nas condições em que seria aplicado numa solução de cobertura, quantificando o volume de água escoada para o recipiente instalado sob a amostra e o volume de água retido no sistema.

Uma vez que para a realização deste ensaio é necessária uma quantidade de substrato significativa, não foi possível caracterizar os novos substratos, tendo sido avaliado apenas o comportamento do substrato de referência.

3.5.2 Procedimento do ensaio

O ensaio iniciou-se com a preparação do tabuleiro. Para isso, utilizou-se um tabuleiro de polipropileno com dimensões (0,5 x 0,5 x 0,1)m, contendo agregado leve de argila expandida a cobrir o fundo, sobre o qual foi aplicado um filtro geotêxtil e, sobre este, o substrato.

O ensaio foi realizado em condições laboratoriais controladas (20°C e 50% humidade relativa) para evitar influência de fenómenos evaporativos. Para o caso do substrato, este foi ensopado e escoado 24 horas previamente à realização do ensaio, como se ilustra a figura 24.



Figura 24: Saturação e escoamento da amostra antes de dar início ao ensaio.

De seguida, colocou-se a amostra no suporte, com a proteção lateral para evitar a projeção da água descarregada e correntes de ar. Limpou-se o dispositivo de descarga, de modo a evitar possíveis entupimentos dos furos causados por poeiras ou resíduos. Verificou-se toda a estrutura, para confirmar que todos os apoios estavam estáveis e nivelados para que a drenagem seja feita corretamente. Colocou-se o reservatório sobre a balança e retirou-se a tara. Verificou-se o bom funcionamento da balança, assim como, o registo no computador, figura 25.

O dispositivo de descarga é constituído por uma estrutura de madeira (0,5 x 0,5)m com a mesmas dimensões de um módulo de uma cobertura verde. Seguindo das recomendações das FLL, a água é escoada através de 37 furos com 1mm de diâmetro, distribuídos uniformemente pela superfície com o intuito de simular um evento de chuva.

Antes de dar início ao ensaio propriamente dito, realizaram-se duas descargas (uma sem tabuleiro e outra com o tabuleiro vazio), que serviram para obter dados de referência.

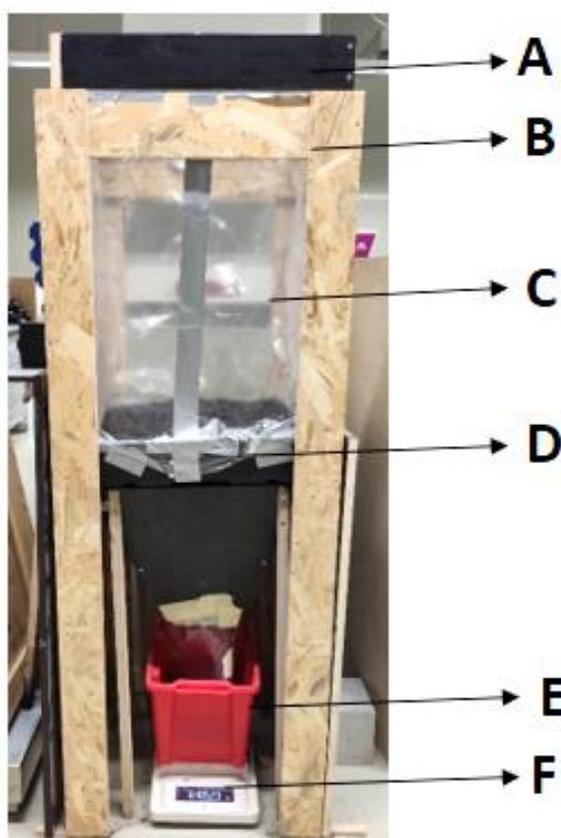


Figura 25: Representação da estrutura do ensaio de drenagem e retenção. (A- Dispositivo de descarga; B- Estrutura de suporte; C- Estrutura de proteção; D- Módulo da cobertura verde; E- Recipiente; F- Balança).

Após o condicionamento da amostra, a montagem da estrutura e verificação da mesma, foi determinado a massa de água a aplicar no dispositivo de descarga através das recomendações das FLL, sendo que, a capacidade máxima de retenção é calculada para uma área equivalente a um hectare para uma taxa de precipitação de 300 litros/segundo, o que representa um evento de precipitação intensa com duração de 15 minutos. Posto isto, o volume de água a ser aplicado para os 0,25 metros quadrados do módulo da cobertura verde foi de 6,75 litros.

Seguidamente deu-se início ao ensaio com o registo da variação de massa através de uma balança com capacidade de registo em contínuo com auxílio de um computador. Após 24 horas, conclui-se o ensaio e foram recolhidos os dados registados. Durante este ensaio foi repetido o mesmo procedimento de descarga três vezes em intervalos de 24 horas. Por fim, fez-se uma pesagem final do provete.

Foram realizados dois ensaios, um com o substrato previamente saturado (Ensaio 1) e outro com o substrato em condições normais (Ensaio 2).

3.6 Permeabilidade ao vapor de água

3.6.1 Princípio

O princípio deste ensaio assenta na quantificação do vapor de água que atravessa o substrato ao longo de um determinado período de tempo. Para isso, criaram-se dois ambientes em que se fez variar a humidade relativa. Numa tina metálica colocou-se sílica gel e no aro metálico, localizado na parte superior do conjunto, colocaram-se as amostras de substrato que foram previamente condicionadas numa câmara climática a 23°C e 50% de humidade relativa.

3.6.2 Procedimento do ensaio

A preparação dos provetes consistiu em colocar o substrato numa tina metálica vazada. Para se conseguir reter o material colou-se uma gaze que foi fixada com silicone, conforme ilustra a figura 26-a). Numa segunda tina colocou-se o dessecante, neste caso a sílica gel, como se pode ver na figura 26-b). A montagem final dos provetes consiste em colocar a tina com substrato sobre a tina com a sílica gel, figura 26-c). O provete tem as seguintes dimensões: (0,1 x 0,1 x 0,05) m.

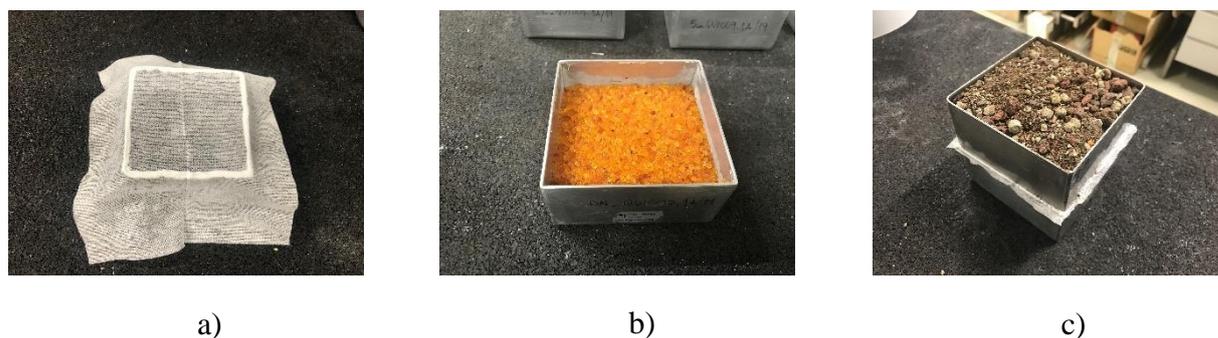


Figura 26: Preparação do provete para o ensaio da permeabilidade ao vapor de água. a) Colagem da gaze; b) Sílica gel no interior da tina; c) Montagem do conjunto.

Após a preparação dos provetes, estes foram condicionados numa câmara climática a 23°C e 50% de humidade relativa até que a massa do conjunto estabilizasse. De modo a controlar o fluxo de vapor através do substrato, foram realizadas pesagens diárias até que a variação corresponda ao estado de equilíbrio.

Por fim, e para que fosse possível obter os valores da permeabilidade ao vapor de água, efetuaram-se cálculos recorrendo às seguintes expressões:

Varição da massa do conjunto:

$$G_{1,2} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad (mg/h)$$

em que: m_1 - massa do conjunto no tempo 1 (mg); m_2 - massa do conjunto no tempo 2 (mg); t_1 e t_2 - tempos das pesagens sucessivas (h).

Para a obtenção do G foi feita a média de cinco determinações sucessivas $G_{1,2}$, para cada provete, em miligramas por hora.

Permeância ao vapor de água:

$$W = \frac{G}{A \times \Delta} \quad (mg/(h \cdot m^2 \cdot Pa))$$

em que: Δp - 1400 Pa, para condições 23°C e 50% humidade relativa.

Permeabilidade ao vapor de água:

$$\delta = W \times d \quad (mg/(m \cdot h \cdot Pa))$$

em que: d - espessura do provete (m).

3.7 Câmara Bioclimática

3.7.1 Princípio

Como já foi referido no capítulo 2.4.1.3, alguns dos benefícios das coberturas verdes são o aumento do isolamento térmico dos edifícios e a mitigação do efeito de ilha de calor. Para estudar estes fenómenos, será necessário analisar e quantificar fluxos de calor, assim como determinar temperaturas superficiais e interfaciais de uma solução completa em condições ambientais controladas. Uma forma de o fazer, é recorrer a uma câmara bioclimática capaz de simular regimes de temperaturas, permanente e variável, em situação de inverno ou verão, com e sem chuva.

Na figura 27 é possível observar uma câmara bioclimática instalada no Itecons, constituída por duas câmaras sobrepostas que estabelecem ligação entre elas, através de uma estrutura onde é colocado o provete. A câmara superior simula as condições exteriores enquanto que a câmara inferior, simula as condições interiores.

A estrutura é constituída por painéis do tipo sandwich com espuma de poliuretano injetada e acabamento em aço galvanizado.



Figura 27: Câmara Bioclimática.

3.7.2 Montagem do provete

Através deste ensaio é possível caracterizar e comparar vários substratos. Os substratos serão preparados sobre uma laje de betão isolada com dois tipos de isolamento distintos: A - convencional (XPS) e B - aglomerado de cortiça (ICB). O sistema A é constituído pelo substrato, seguido de uma camada drenante, camada de isolamento térmico (XPS) e laje; o sistema B é constituído pelo substrato, camada drenante e, simultaneamente, de isolamento térmico (ICB) e laje. Na figura 28 ilustra-se a montagem dos provetes no interior da câmara bioclimática.

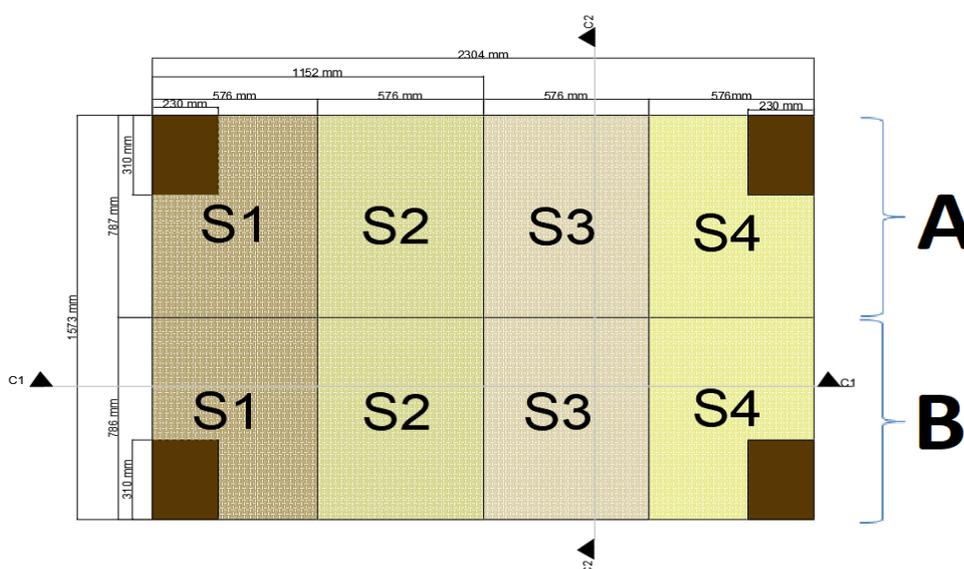


Figura 28: Representação esquemática dos dois sistemas (vista em planta). A) sistema convencional; B) sistema com cortiça.

Para a medição da temperatura são utilizados termopares e para monitorizar os fluxos de calor são utilizados termo-fluxímetros, recolhendo dados ao longo do tempo com recurso a um data logger. Nas figuras 29 e 30, está representada a distribuição dos termopares e fluxímetros para os cortes C1 e C2, respetivamente.

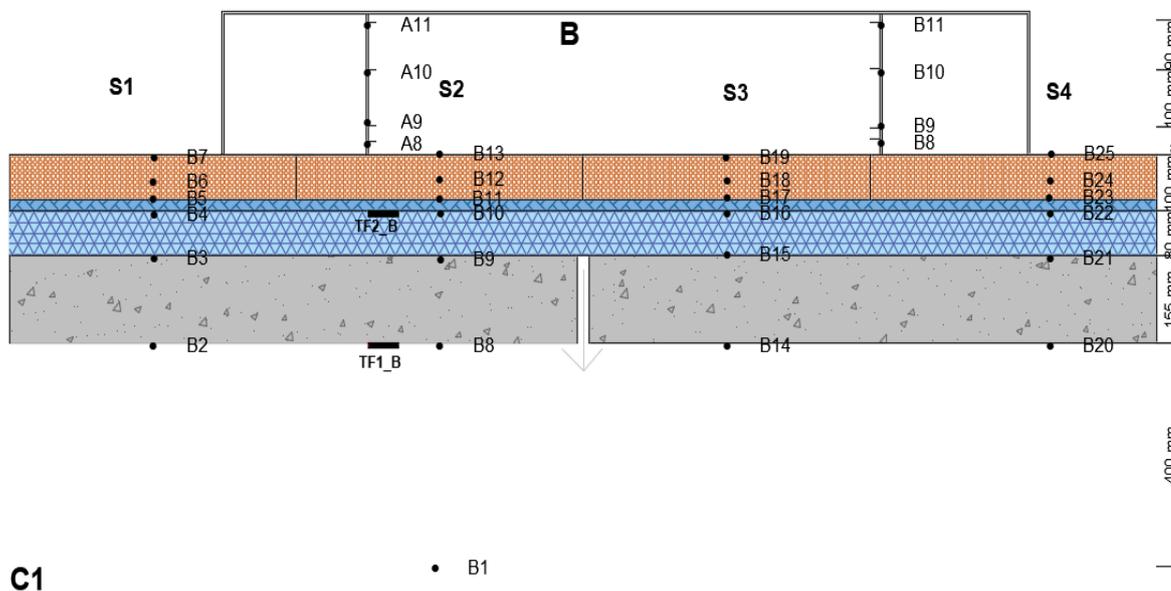


Figura 29: Representação da destruição dos termopares e fluxímetros para o corte C1.

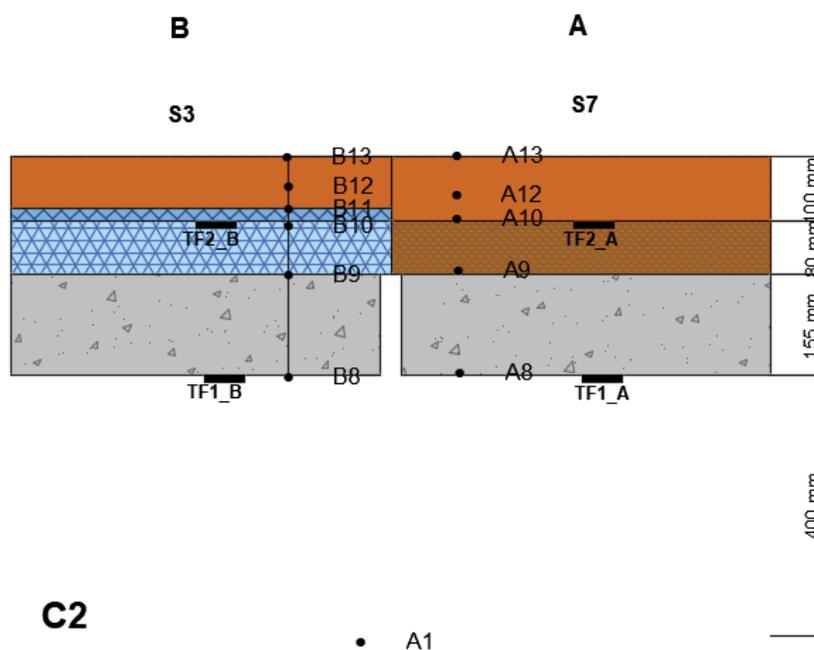


Figura 30: Representação da destruição dos termopares e fluxímetros para o corte C2.

3.7.3 Procedimento de ensaio

Para esta campanha, a câmara inferior irá simular as condições do ambiente interior e será programada a uma temperatura constante de 20 °C, tanto para a estação de arrefecimento como

de aquecimento. A câmara superior irá simular o ambiente exterior e será programada de modo a simular ciclos de inverno e verão, em regime permanente e variável, com e sem chuva.

Para a situação de inverno, a condição imposta à câmara superior para o regime permanente será de 5°C, enquanto que para o regime variável variará entre os 0°C e 15°C. Para a situação de verão, a condição imposta à câmara superior para o regime permanente será de 30°C, enquanto que para o regime variável variará entre os 10 °C e 35°C.

Serão realizadas medições ao longo de 4 dias para o regime permanente e 7 dias para o regime variável, para as situações de inverno e verão. Os registos serão efetuados em intervalos de 1 minuto para as temperaturas, e em intervalos de 10 minutos para os fluxos de calor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo está organizado em subcapítulos onde são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas várias campanhas experimentais, pela seguinte ordem, condutibilidade térmica, emissividade, albedo, capacidade de drenagem e retenção de água e permeabilidade ao vapor de água.

A tabela 9 resume quais os substratos utilizados em cada ensaio.

Tabela 9: Tabela resumo das amostras de substratos utilizados por ensaio.

Amostra	Condutibilidade Térmica	Emissividade	Albedo	Drenagem e Retenção de água	Permeabilidade ao Vapor
SR01	X	X	X	X	X
SR02	X	X			X
S03	X	X			X
S04	X	X			X
S05	X	X			
S06	X	X			
S07	X	X			X
S08	X	X			X
S09	X	X			X
S10	X	X			
S11	X	X			
S12	X	X			
S13	X	X			X
S14	X	X			X
S15	X	X			X

4.1 Condutibilidade térmica

Como foi anteriormente exposto, de modo a caracterizar o comportamento térmico dos substratos, realizaram-se quatro ensaios em que os substratos foram submetidos a quatro teores de humidade diferentes: seco, 50%, 80% e saturado. Os ensaios foram realizados para quatro temperaturas predefinidas: 10°C, 25°C e 40°C.

Analisaram-se os resultados obtidos para a condutibilidade térmica em função de três parâmetros: massa volúmica, temperatura e teor de água.

4.1.1 Condutibilidade térmica em função da massa volúmica

As figuras 31 a 34 apresentam as condutibilidades térmicas dos 15 substratos em função da massa volúmica. Cada uma das figuras é referente a um condicionamento específico, de seco a saturado, passando pelas condições de 23°C/50% HR e 23°C/80% HR. De um modo geral a condutibilidade térmica aumenta com a massa volúmica, apesar da diversidade de composições dos substratos. No caso dos substratos saturados essa linearidade é mais evidente.

A situação das amostras condicionadas a 23°C/80% de humidade relativa apresentou um conjunto de pontos que, apesar de apresentarem massas volúmicas superiores, não correspondem a maiores condutibilidades térmicas, não se verificando a dependência linear referida antes.

Registe-se que a maior condutibilidade térmica no estado seco rondava o valor de 0,1 W/m°C, atingindo valores acima de 0,275 W/m°C no estado saturado, ou seja um aumento superior a 275%.

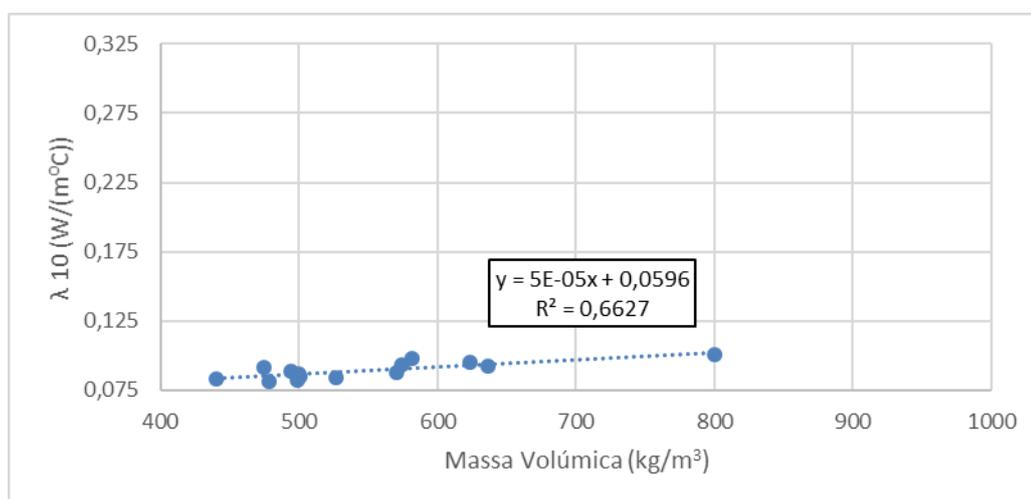


Figura 31: Condutibilidade térmica em função da massa volúmica para os 15 substratos no estado seco.

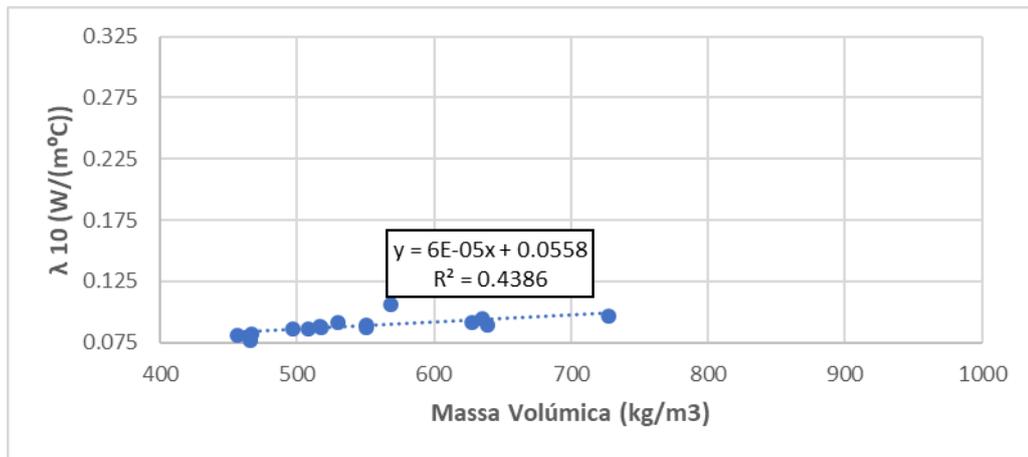


Figura 32: Condutibilidade térmica em função da massa volúmica, para os 15 substratos com condicionamento a 23°C/ 50%

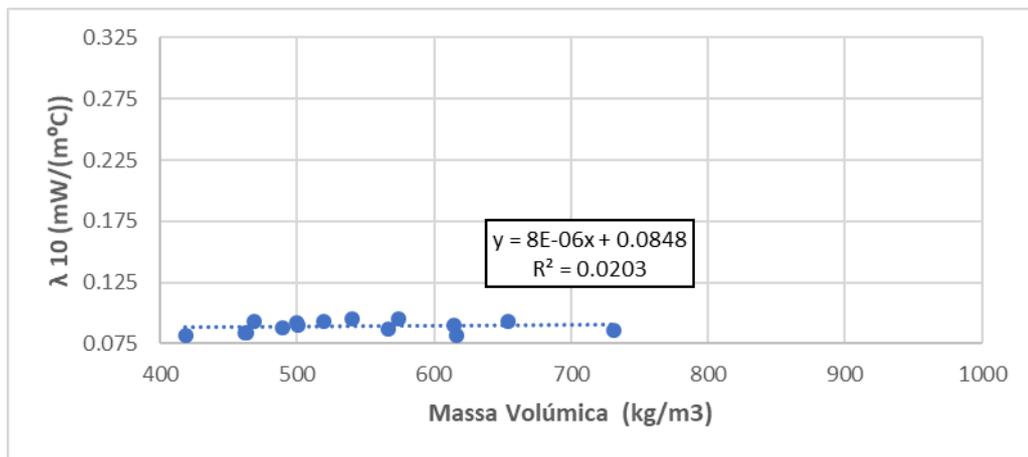


Figura 33 Condutibilidade térmica em função da massa volúmica, para os 15 substratos com condicionamento a 23°C/80%.

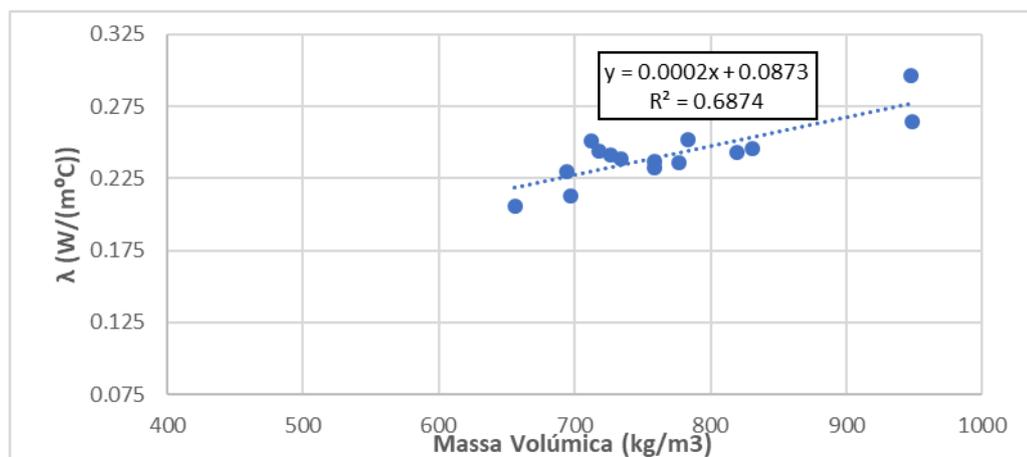


Figura 34: Condutibilidade térmica em função da massa volúmica, para os 15 substratos com condicionamento saturado.

4.1.2 Condutibilidade térmica em função da temperatura

Neste subcapítulo é estudado qual o comportamento da condutibilidade térmica para diferentes temperaturas médias. Foram selecionadas três amostras de substratos, SR01, S03 e S07, para representar graficamente, uma vez que o comportamento é similar nos restantes substratos.

As figuras 35, 36 e 37 representam a evolução da condutibilidade térmica para as três amostras em função da temperatura. Percebe-se que existe uma relação direta entre a temperatura e a condutibilidade térmica quando os substratos se encontram saturados, isto é, existe um aumento linear dos valores da condutibilidade térmica. Para a temperatura média de 10 °C, o aumento de condutibilidade térmica, entre o estado seco e o saturado varia entre os 139,9% e 224,8% para os provetes S10 e S04, respetivamente.

Para as condições seco, 50% e 80% de humidade relativa, não é visível uma relação entre a condutibilidade térmica e a temperatura média de ensaio, visto que a variação da condutibilidade térmica é bastante reduzida entre as diferentes temperaturas.

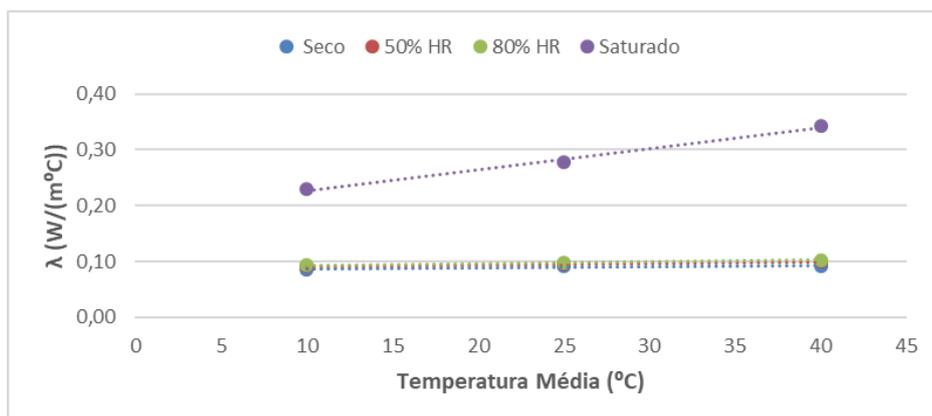


Figura 35: Representação da condutibilidade para a amostra SR01 em função à temperatura média para as condições de 23°C e a seco, 50% HR, 80% HR e saturado.

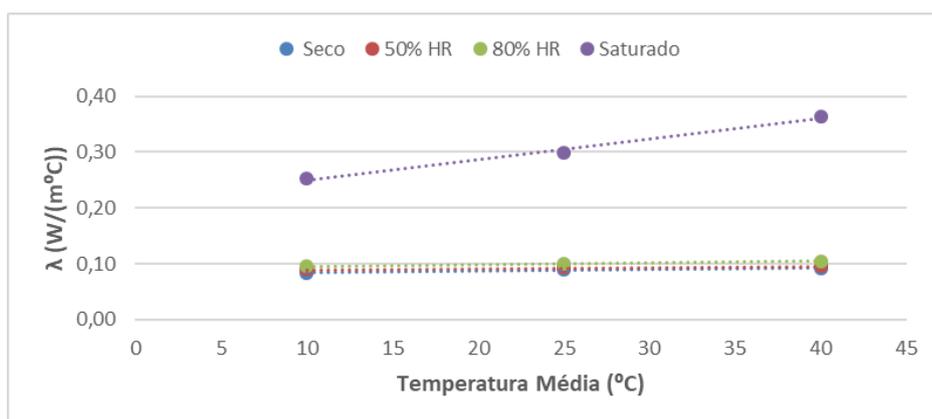


Figura 36: Representação da condutibilidade para a amostra S03 em função à temperatura média para as condições de 23°C e a seco, 50% HR, 80% HR e saturado.

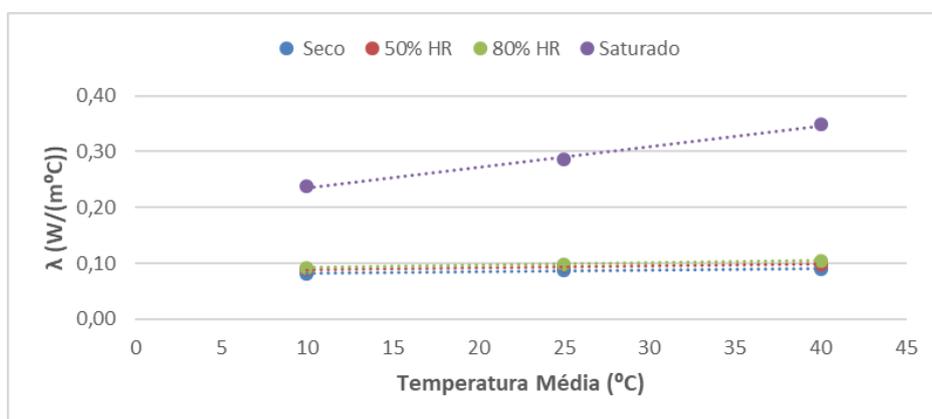


Figura 37: Representação da condutibilidade para a amostra S07 em função à temperatura média para as condições de 23°C e a seco, 50% HR, 80% HR e saturado.

4.1.3 Condutibilidade em função do teor de água

De maneira a representar a evolução da condutibilidade térmica de acordo com o teor em água determinou-se, primeiro, o teor de água em cada amostra utilizando a seguinte expressão:

$$\text{Teor de água} = \frac{M_i - M_{seca}}{M_{seca}} \quad (kg)$$

Em que: M_i , -corresponde à massa das amostras após condicionamento (seco, 50%, 80% e saturado), em kg; M_{seca} -corresponde a massa das amostras em estado seco, em kg.

Na tabela 10, são apresentados os resultados do teor em água assim como da condutibilidade térmica obtida para a temperatura de 10 °C. Em anexo encontram-se os resultados da massa, teor em água e respetiva condutibilidade térmica para todos os substratos caracterizados.

Tabela 10: Resultados do teor em água e condutibilidade térmica obtidos à temperatura 10 °C das três amostras.

Amostras	Condição: Seco		Amostras	Condição: 23 °C/50% HR	
	Teor em água (%)	λ_{10} (W/(m°C))		Teor em água (%)	λ_{10} (W/(m°C))
SR01	0	0,085	SR01	2,21	0,091
S03	0	0,084	S03	2,74	0,089
S07	0	0,082	S07	3,21	0,089
Amostras	Condição: 23 °C/80% HR		Amostras	Condição: Saturado	
	Teor em água (%)	λ_{10} (W/(m°C))		Teor em água (%)	λ_{10} (W/(m°C))
SR01	3,25	0,093	SR01	102,36	0,230
S03	4,40	0,095	S03	99,08	0,252
S07	6,02	0,092	S07	110,18	0,237

As figuras 38, 39 e 40 traduzem a variação da condutibilidade para os diferentes teores de água nas amostras SR01, S03 e S07, respetivamente. Conclui-se que há uma dependência clara entre a condutibilidade e o teor em água nas três amostras, uma vez que a condutibilidade térmica aumenta de forma proporcional com o teor em água. Os coeficientes de correlação para cada substrato são bastante elevados, muito próximos de 1.

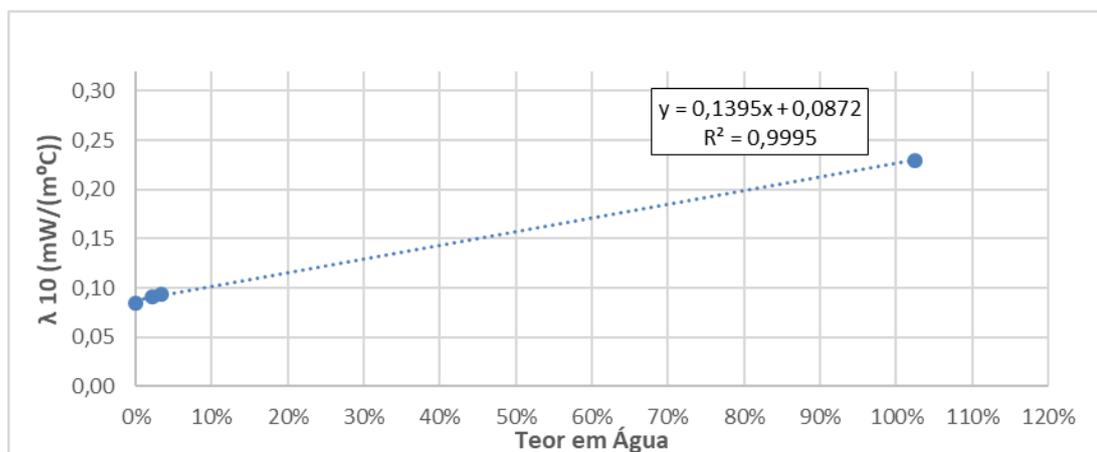


Figura 38: Representação da condutibilidade térmica para a amostra SR01 em relação ao teor em água nas condições a seco, a 23°C/50%, a 23°C/80% e saturado.

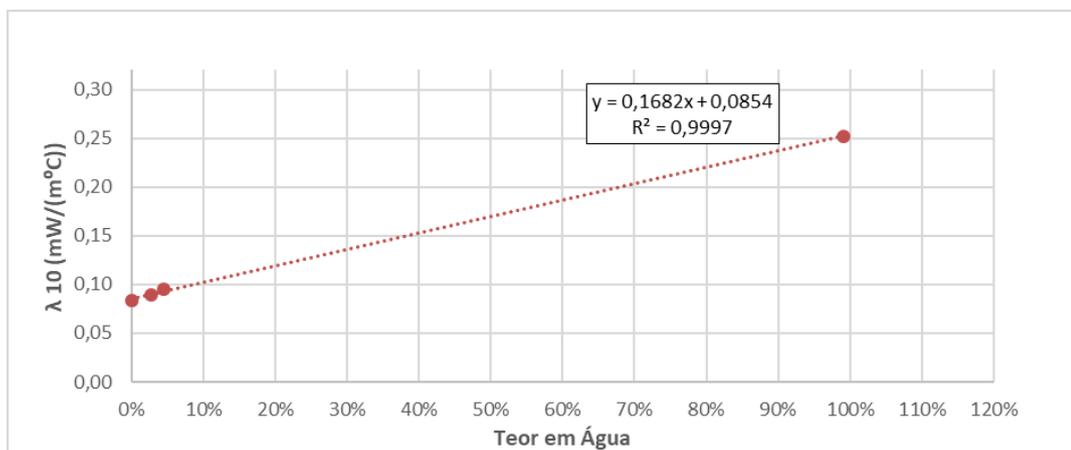


Figura 39: Representação da condutibilidade térmica para a amostra S03 em relação ao teor em água nas condições a seco, a 23°C/50%, a 23°C/80% e saturado.

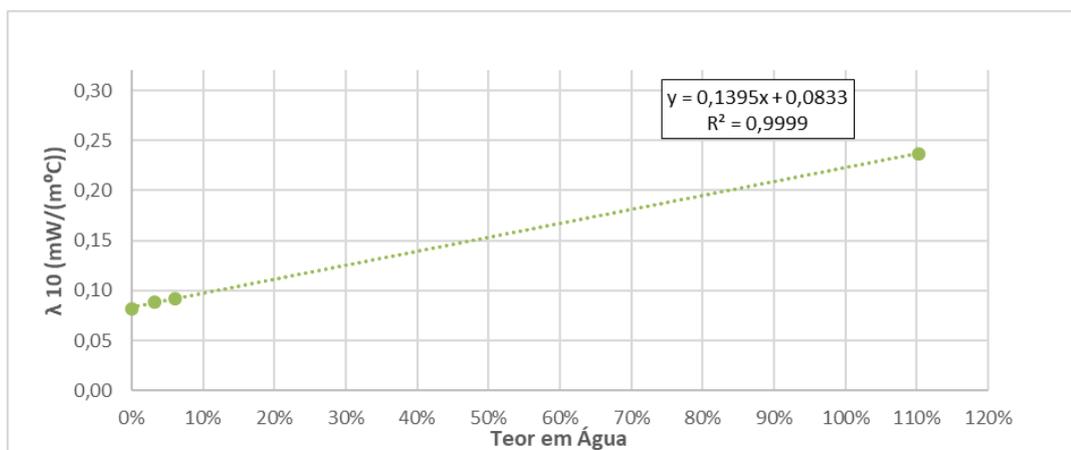


Figura 40: Representação da condutibilidade para a amostra S07 em relação ao teor em água nas condições a seco, a 23°C/50%, a 23°C/80% e saturado.

4.2 Emissividade

Para analisar a emissividade, foi feita uma comparação entre os valores obtidos para cada substrato e para cada condição imposta. A figura 41 representa os valores de emissividade média para os vários teores de humidade relativa dos substratos.

Observando o gráfico da figura 41 conclui-se que os valores de emissividade variam consoante as condições impostas aos substratos. Verifica-se que para as amostras saturadas, a emissividade atingiu valores que variaram entre 0,916 e 0,968, enquanto que para condições a seco atingiram valores de emissividade entre 0,647 e 0,770. Existe uma exceção para a amostra SR01, pois o valor da emissividade no estado seco é praticamente igual ao valor obtido para a condição 23°C/80% HR.

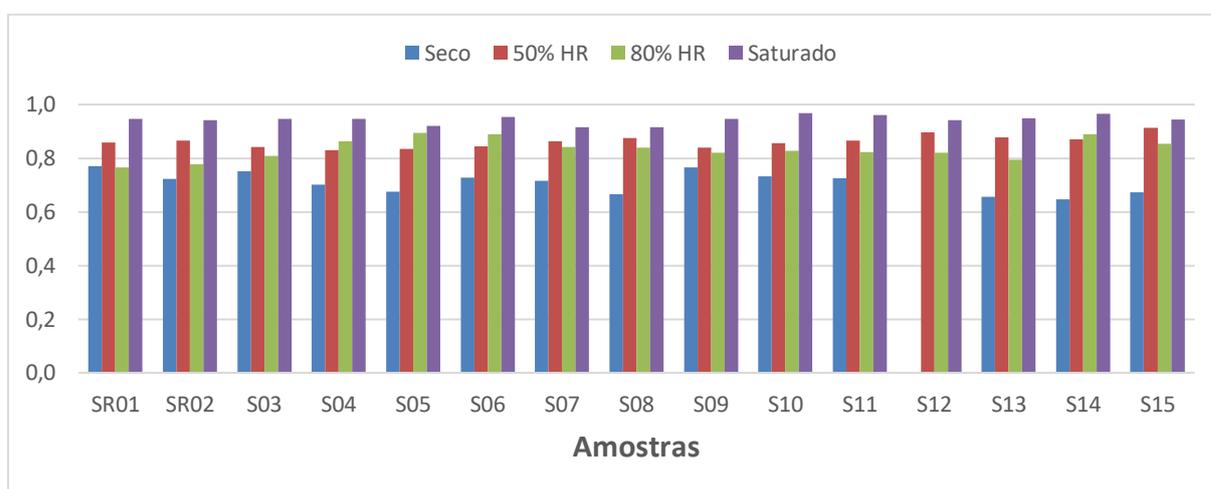


Figura 41: Representação da emissividade para as quatro condições seco, 50%, 80% e saturado.

4.3 Albedo

Devido à quantidade de material necessário para a realização deste ensaio apenas foi possível medir o albedo para o substrato de referência SR01.

A figura 42 representa a evolução do albedo ao longo do dia 9/10/2019 entre as 10h00 e as 16h00 para garantir que não havia sombra da envolvente. Os valores do albedo foram praticamente constantes no decorrer do dia, variando entre 0,1 e 0,15, havendo pequenas oscilações devido à rega realizada às 10, 12, 14, 16 e 18 horas.

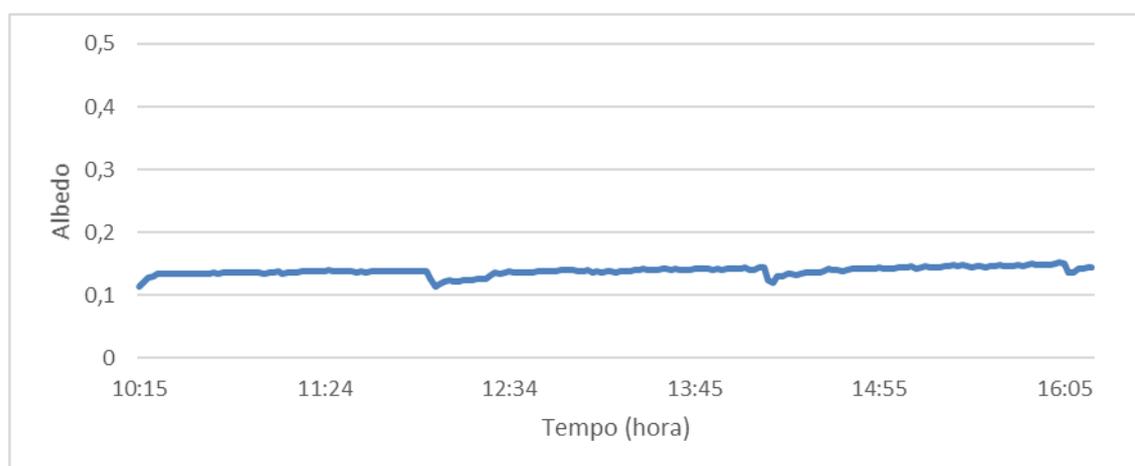


Figura 42: Valores de albedo referentes ao substrato SR01, ao longo do dia 9/10/2019.

Em relação à radiação global, concluiu-se que esta não afeta os valores de albedo, isto é, se os valores da radiação global aumentarem os valores de albedo não aumentam, como é visível no gráfico da figura 43. Observa-se um aumento repentino da radiação global sensivelmente às 10h, causado pelo sombreamento das árvores existentes junto ao local de ensaio do lado direito do edifício Itecons.

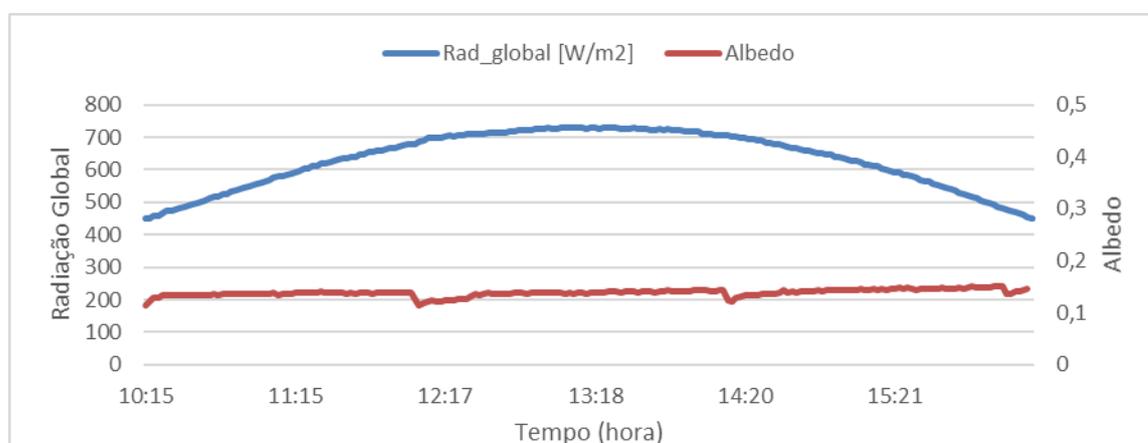


Figura 43: Representação da radiação global e albedo referente ao substrato SR01, ao longo do dia 9/10/2019.

Quando comparamos os valores de albedo do substrato, figura 42, com os valores obtidos do tabuleiro com vegetação no dia 18/11/2019, figura 44, verifica-se que existe um pequeno aumento dos valores do albedo entre os 0,15 e 0,25, com a presença da vegetação.

Mais uma vez, no gráfico da figura 45, verifica-se que o albedo não sofre alterações significativas com a variação da radiação global. As perturbações visíveis nas figuras 43 e 45, são causadas pelo fato de, nesse dia, o céu apresentar períodos com nuvens.

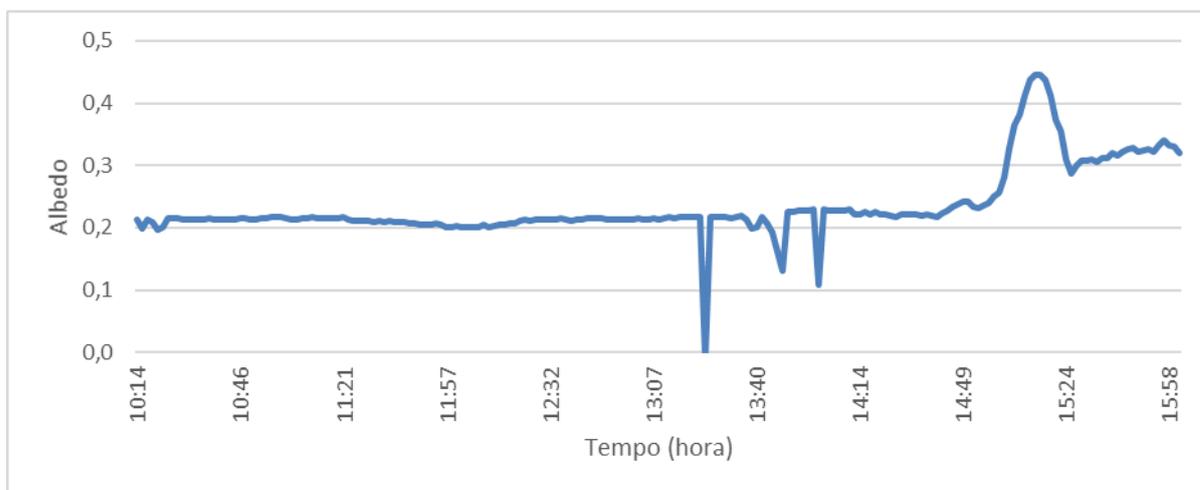


Figura 44: Valores de albedo do tabuleiro com vegetação, ao longo do dia 18/11/2019.

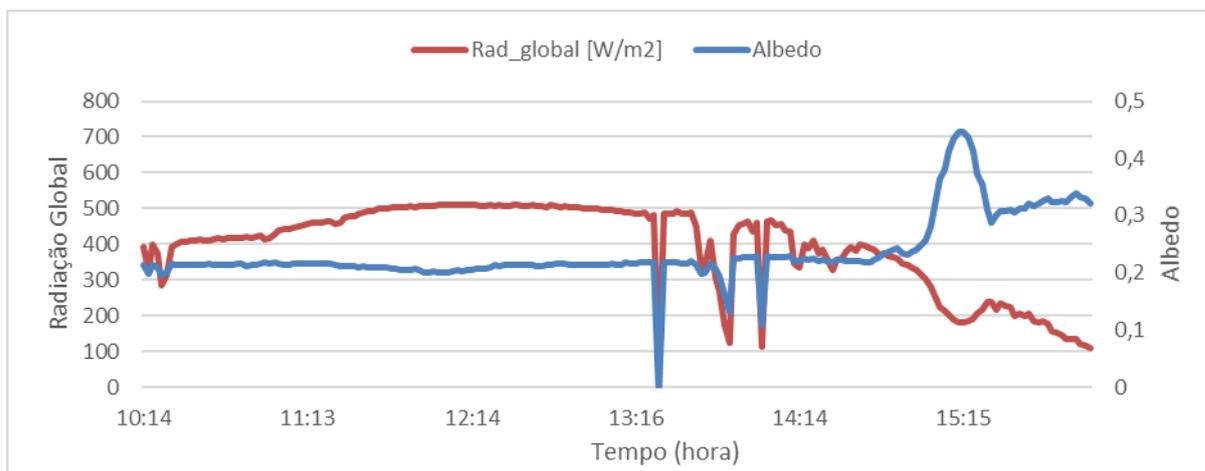


Figura 45: Representação da radiação global e albedo referente ao tabuleiro com vegetação, ao longo do dia 18/11/2019.

4.4 Drenagem e Retenção de Água

Neste subcapítulo serão discutidos e apresentados os resultados obtidos no ensaio de drenagem e retenção de água. Para a análise dos resultados serão disponibilizados gráficos, apenas para os primeiros 60 minutos de ensaio, e tabelas de forma a facilitar a análise dos resultados obtidos. Foi feita uma comparação dos resultados obtidos para o substrato ensaiado e os obtidos para as descargas com tabuleiro vazio e sem tabuleiro. O gráfico da figura 46 representa as descargas efetuadas com e sem tabuleiro.

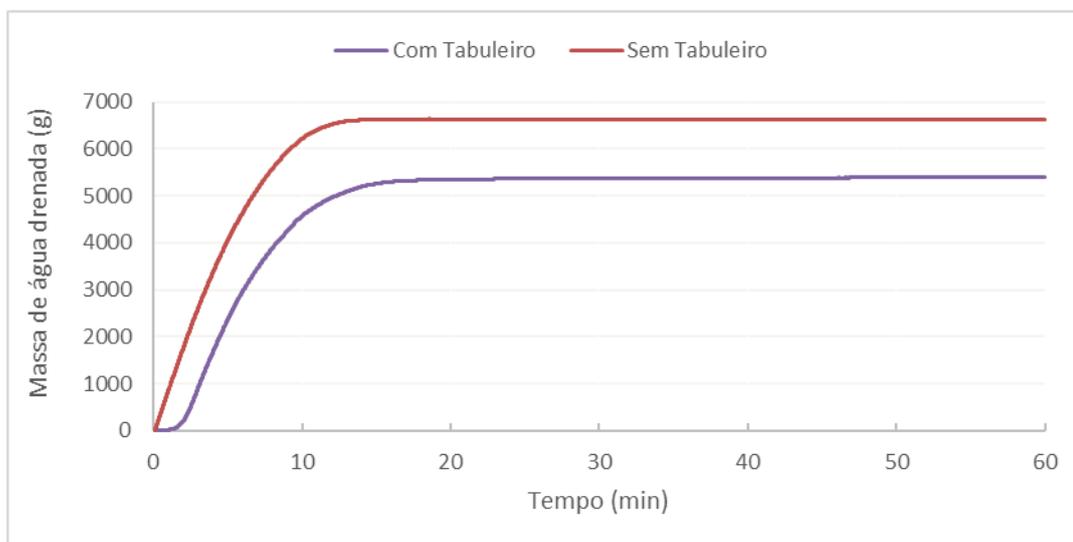


Figura 46: Massa de água drenada após 60 min da descarga para o ensaio com e sem tabuleiro.

Na figura 47, encontram-se os valores de massa de água drenada na primeira hora para as descargas com e sem tabuleiro e para as três descargas com o substrato inicialmente saturado, com um intervalo de 24 horas entre cada descarga. Constatase que a quantidade de água drenada nas três descargas é muito semelhante, sendo ligeiramente superior na descarga 3, atingindo 95% de água drenada. A descarga 1 reteve 8,62% de água, sendo esta superior às descargas 2 e 3 que apenas retiveram 5,11 % e 4,81 %, respectivamente, tabela 11.

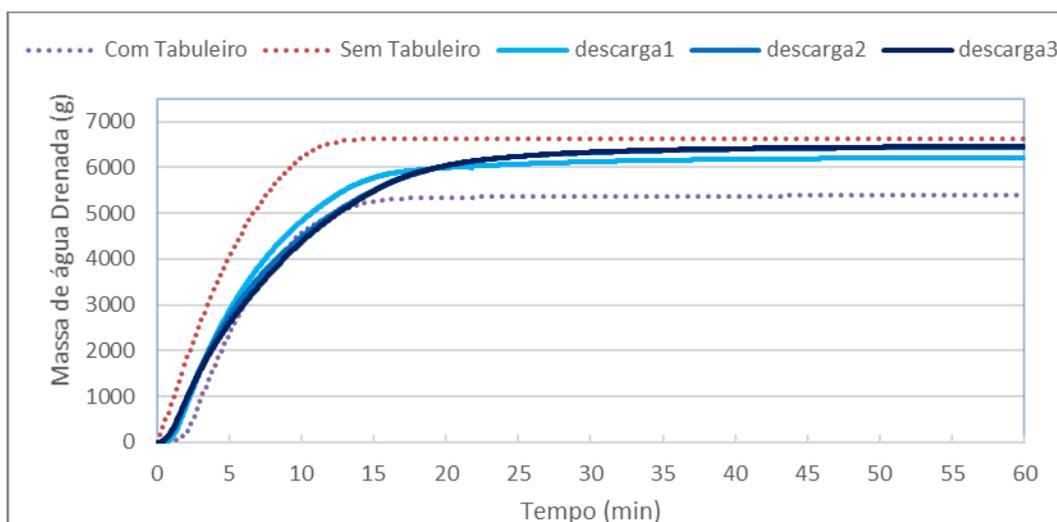


Figura 47: Massa de água drenada nos primeiros 60 min, com e sem tabuleiro e para as três descargas com o substrato SR01 inicialmente saturado.

Tabela 11: Quantidade de massa drenada e retida, com o substrato inicialmente saturado para as três descargas.

Descarga	Massa total de água drenada (g)	Massa total de água drenada (%)	Massa total de água retida (g)	Massa total de água retida (%)
1	6168,16	91,38	581,84	8,62
2	6405,25	94,89	344,75	5,11
3	6425,36	95,19	324,64	4,81

Na tabela 12, mostra o tempo em minutos que foi necessário para atingir 25 %, 50 % e 75% de água drenada, nas três descargas com substrato. A descarga 1 drenou 75 % de massa de água num menor tempo em relação às descargas 2 e 3.

Tabela 12: Tempo necessário para atingir 25%, 50% e 75% de água drenada, na descarga 1, 2 e 3.

Descarga	Tempo de drenagem (min)		
	25%	50%	75%
1	2,98	5,43	9,30
2	3,02	6,06	11,33
3	3,08	6,53	11,72

Na figura 48, encontram-se as curvas para as duas descargas com e sem tabuleiro e para as três descargas com o substrato inicialmente sem nenhum tipo de condicionamento.

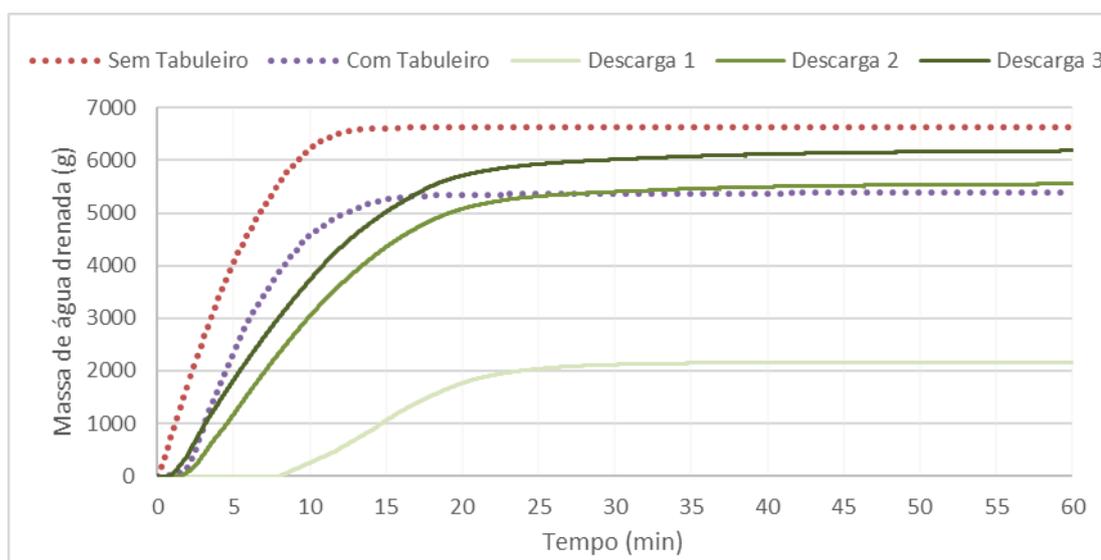


Figura 48: Massa de água drenada nos primeiros 60 min, com e sem tabuleiro e para as três descargas com o substrato inicialmente às condições ambiente.

Tabela 13: Quantidade de massa drenada e retida, com o substrato inicialmente às condições ambientes, para as três descargas.

Descarga	Massa total de água drenada (g)	Massa total de água drenada (%)	Massa total de água retida (g)	Massa total de água retida (%)
1	2072,91	30,71	4677,09	69,29
2	5449,81	80,74	1300,19	19,26
3	6134,77	90,89	615,23	9,11

É notável a capacidade de retenção de água do substrato na descarga 1, cerca de 69%, quando se encontra em condições normais, tabela 13. Após a descarga 1 a sua capacidade de retenção vai diminuindo, sendo elas de 19,26% e 9,11% para as descargas 2 e 3, respectivamente. Esse aumento de drenagem de água deve-se ao fato do substrato já estar saturado devido às descargas anteriores. Na tabela 14 apresentam-se as massas dos provetes 1 e 2 antes e depois do ensaio. Verifica-se que no ensaio 1 existe uma variação de massa do provete de 9,96 kg, enquanto que no ensaio 2 é de 5,56 kg.

Tabela 14: Massa antes e depois do provete para o ensaio 1 e 2.

Ensaio	Massa do provete (kg)		Δ Massa (kg)
	Antes do Ensaio	Depois do ensaio	
1	8,60	18,56	9,96
2	9,46	15,02	5,56

4.5 Permeabilidade ao vapor de Água

Os resultados do ensaio da permeabilidade ao vapor de água serão apresentados através de uma tabela, que dispõe informação acerca da variação da massa do conjunto, permeância e a permeabilidade ao vapor de água, e gráficos com a representação da evolução da massa do conjunto em função do tempo. De maneira a simplificar a interpretação da figura 49 apenas serão representadas graficamente as amostras: SR01, S07 e S14. O comportamento dos restantes substratos também revelam uma variação linear.

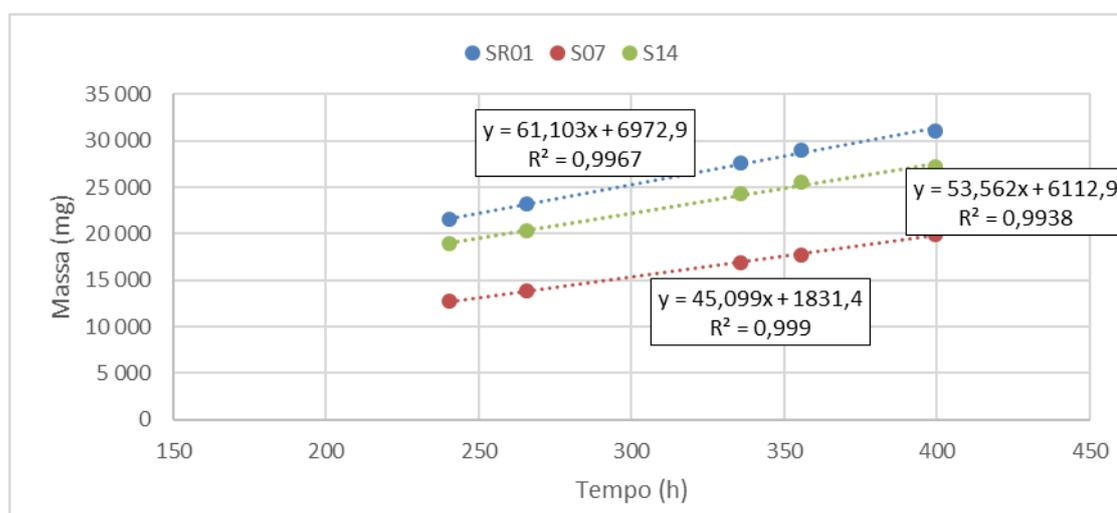


Figura 49: Representação da evolução da massa em função do tempo, para os cinco últimos registros das amostras SR01, S07 e S14.

Através do gráfico figura 49, verifica-se que existe um aumento linear da massa do conjunto ao longo do tempo, para as três amostras.

Na tabela 15 estão disponibilizados os valores obtidos nos cálculos da permeabilidade ao vapor de água, com as expressões mencionadas na secção 3.6.2. Os valores variam desde 0,09 até 0,24 mg/(m·h·Pa), sendo o menor valor do substrato com a referência S15 e o maior valor do substrato SR01

Tabela 15: Valores obtidos da determinação de: Variação da massa do conjunto (G), Permeância ao vapor de água (W) e Permeabilidade ao vapor de água (δ).

Amostra	G (mg/h)	W (mg/(h.m².Pa))	δ (mg/(m·h·Pa))
SR01	66,65	4,76	0,24
SR02	60,39	4,31	0,22
S03	28,46	2,03	0,10
S04	25,37	1,81	0,09
S07	46,59	3,33	0,17
s08	43,09	3,08	0,15
S09	28,34	2,02	0,10
S13	24,74	1,77	0,09
S14	53,10	3,79	0,19
S15	24,04	1,72	0,09

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado. Adicionalmente, são identificados possíveis trabalhos futuros relevantes no âmbito do tema desta dissertação.

5.1 Principais conclusões

O presente trabalho teve como objetivo principal sistematizar métodos de ensaio e aplicá-los na avaliação de novos substratos técnicos sustentáveis, cujo desenvolvimento assentou na utilização de resíduos industriais de base inorgânica e orgânica, para aplicação em coberturas verdes. A campanha experimental contemplou a caracterização higrotérmica (condutibilidade e permeabilidade ao vapor), ótica (emissividade e albedo) e hídrica (drenagem e retenção de água) dos substratos.

Para avaliar o comportamento térmico dos substratos, analisou-se a relação da condutibilidade térmica com a massa volúmica, a temperatura e o teor em água. As principais conclusões foram:

- O teor de humidade presente no substrato tem influência nos valores condutibilidade térmica;
- A condutibilidade térmica é influenciada pela massa volúmica para as condições a seco, 23°C/50%HR e saturado, sendo que para o estado seco aumenta 24,15 % e para o estado saturado aumenta 43,69%;
- A temperatura tem mais influência nos valores da condutibilidade térmica quando os substratos se encontram saturados (137,2% e 217,4% para as condições de seco e saturado, respetivamente);
- O teor em água presente nos substratos apenas tem influência na condutibilidade térmica quando as amostras se encontram saturadas, obtendo-se valores de 0,23, 0,25 e 0,24 W/(m·°C) para os substratos SR01, S03 e S07, respetivamente.

O ensaio da emissividade foi realizado para as condições a seco, 23°C/50%HR, 23°C/80%HR e saturado para os quinze substratos. Conclui-se que:

- Atingem-se valores máximos de emissividade quando os substratos se encontram saturados, tendo-se obtido um valor de 0,968 que corresponde ao substrato S10;
- Foram obtidos valores de emissividade mais baixos quando os substratos se encontram no estado seco, tendo-se obtido um valor de 0,647 que corresponde ao substrato S14.

Para o ensaio do albedo apenas se caracterizou o substrato SR01 e comparou-se com um sistema de cobertura verde. Verificou-se que:

- Os valores do albedo do substrato variam entre 0,1 e 0,15 e do tabuleiro com vegetação variam entre 0,15 e os 0,25, existindo um aumento relativamente ao tabuleiro só com o substrato;
- Há uma perturbação nos valores do albedo devido ao efeito da rega;
- Os valores da radiação global não alteram os valores do albedo.

Para estudar o comportamento hídrico, foi realizado o ensaio de drenagem e retenção de água. Foi caracterizado o substrato SR01 seguindo as recomendações das *FLL* (Ensaio 1) e em condições normais (Ensaio 2). Foi possível concluir que:

- O Ensaio 2 conduz a maior capacidade de retenção de água relativamente ao ensaio 1, tendo retido em média para as 3 descargas 32,56%.
- A quantidade de água presente no substrato influencia a capacidade de drenagem e retenção de água, visto que, no Ensaio 1 o substrato apresenta maior capacidade de retenção na descarga 1 e menor capacidade de retenção nas restantes descargas;
- A quantidade de água drenada aumenta ao longo das três descargas e a quantidade de água retida diminui;
- No Ensaio 1 o substrato reteve em média, nas 3 descargas, 6,18% da água aplicada;
- Para o Ensaio 1, a média de água drenada nas três descargas, foi de 93,82% enquanto que no Ensaio 2 foi de 67,44%;

O ensaio da permeabilidade ao vapor de água foi realizado numa câmara climática nas condições de 23°C e 50% HR. Conclui-se que:

- Existe um aumento linear da massa dos provetes ao longo do tempo;
- Os valores da permeabilidade ao vapor de água das amostras caracterizadas variam desde 0,09mg(m·h·Pa), para a amostra S15, até 0,24mg(m·h·Pa), para a amostra SR01, significando que existe uma maior facilidade na passagem do vapor de água para a amostra SR01.

5.2 Trabalhos futuros

Como possíveis desenvolvimentos futuros, e de modo a potenciar o trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação, propõe-se a continuação da caracterização dos substratos que não foram possíveis de analisar por limitações de quantidade de amostra. Ainda no que diz respeito ao ensaio na câmara bioclimática, seria pertinente realizar uma campanha experimental para analisar o comportamento higrotérmico de uma solução de cobertura verde integrando os novos substratos, simulando o comportamento dinâmico de uma semana típica do verão e de uma semana típica do inverno.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, R., Simões, N., Tadeu, A., Palha, P., & Almeida, J. (2019). “*Thermal behaviour of a green roof containing insulation cork board. An experimental characterization using a bioclimatic chamber.*” *Building and Environment*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106179>
- ANCV Green Roofs. (2019). Associação Nacional de Coberturas Verdes. Retrieved September 13, 2019, from <https://www.greenroofs.pt/pt/faq>
- APA. (2019). Agência Portuguesa do Ambiente – “*Políticas _ Resíduos _ Fluxos Específicos de Resíduos _ Resíduos de Construção e Demolição*”. Retrieved November 4, 2019, from <http://apambiente.pt/INDEX.PHP?ref=16&subref=84&sub2ref=197&sub3ref=283>
- Barreiro, C. (2019). Barreiro pioneiro em incentivos às coberturas e paredes verdes em Portugal | Barreiro. Retrieved October 25, 2019, from https://www.cm-barreiro.pt/pages/792?news_id=7719
- Barrio, E. P. Del. (2002). “*Analysis of the green roofs cooling potential in buildings*”. *Energy and Buildings*, 27(2), 179–193. [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(97\)00029-7](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(97)00029-7)
- Bernardino, A. (2018). “*Desempenho Térmico de Revestimentos de Cobertura Utilizando a Técnica da Termografia*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra.
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A. H., & GhaffarianHoseini, A. (2014). “*State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs*”. *Applied Energy*, 115, 411–428. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>
- Carbone, M., Garofalo, G., Nigro, G., & Piro, P. (2014). “*A conceptual model for predicting hydraulic behaviour of a green roof*”. *Procedia Engineering*, 70, 266–274. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.030>
- Carvalho, F. (2017). “*Coberturas verdes : estudo experimental da capacidade de drenagem de água no aglomerado de cortiça expandida*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra
- NEOTURF. (2019). “Uma cobertura verde deve ser projetada e construída respeitando o edifício e promovendo a biodiversidade.” Retrieved September 24, 2019, from <https://www.neoturf.pt/pt/servico/coberturas-verdes>
- Connelly, M., & Hodgson, M. (2013). “*Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs*”. *Applied Acoustics*, 74(10), 1136–1143. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.04.003>

-
- Costa, L. M. L. (2010). "*Espaços Verdes Sobre Cobertura*". Dissertação de Mestrado, Instituto de Agronomia, Lisboa. 97.
- Czemieli Berndtsson, J. (2010). "Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review". *Ecological Engineering*, 36(4), 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>
- Fabiani, C., Coma, J., Pisello, A. L., Perez, G., Cotana, F., & Cabeza, L. F. (2018). "Thermo-acoustic performance of green roof substrates in dynamic hygrothermal conditions". *Energy and Buildings*, Vol. 178, pp. 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.024>
- FLL. (2002). Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau "*Guidelines for the Planning , Execution and Upkeep of Green-roof*" Retrieved from [http://www.greenroofsouth.co.uk/FLL Guidelines.pdf](http://www.greenroofsouth.co.uk/FLL%20Guidelines.pdf)
- Galbrun, L., & Scerri, L. (2017). "Sound insulation of lightweight extensive green roofs". *Building and Environment*, 116, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.008>
- Giordano, D. E., Krüger, E. L., & Erell, E. (2014). "Efeito do albedo em cânions urbanos de cidades médias brasileiras". XV Encontro Nacional de Tecnologia Do Ambiente Construído, 608–617. <https://doi.org/10.17012/entac2014.373>
- Goyena, R. (2019). "*Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Hashemi, S. S. G., Mahmud, H. Bin, & Ashraf, M. A. (2015). "Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 669–679. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.163>
- H. Aziz, Z. Ismail (2011) "Design guideline for sustainable green roof system" ISBEIA 2011 - 2011 IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications, 198-203.
- LECA - Saint Gobain. (2017). "*Coberturas ajardinadas*". 20. Retrieved from www.leca.pt
- Lin, Y. J., & Lin, H. Te. (2011). "Thermal performance of different planting substrates and irrigation frequencies in extensive tropical rooftop greeneries". *Building and Environment*, 46(2), 345–355. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.027>
- Liu, W., Wei, W., Chen, W., Deo, R. C., Si, J., Xi, H., Li, B., Feng, Q. (2019). "The impacts of substrate and vegetation on stormwater runoff quality from extensive green roofs". *Journal of Hydrology*, 576(May), 575–582. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.061>
- Zinco. (2019). "*ZinCo Green Roof Systems*". *Director*, Vol. 5244, pp. 1–72. ZinCo GmbH Unterensingen Germany.
-

-
- Magill, J. D., Midden, K., Groninger, J., Therrell, M. (2011). “*A History and Definition of Green Roof Technology with Recommendations for Future Research*” Department of Plant, Soil, and Agricultural Systems in the Graduate School, 62.
- Mahdiyar, A., Tabatabaee, S., Abdullah, A., & Marto, A. (2018). “*Identifying and assessing the critical criteria affecting decision-making for green roof type selection*”. *Sustainable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.03.007>
- Mahdiyar, A., Tabatabaee, S., Sadeghifam, A. N., Mohandes, S. R., Abdullah, A., & Meynagh, M. M. (2016). “*Probabilistic private cost-benefit analysis for green roof installation: A Monte Carlo simulation approach*”. *Urban Forestry and Urban Greening*, 20, 317–327. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.10.001>
- Mannheim, (c) Michael Probst Stuckmann netconstructions.de. (2019). ZinCo Green Roof Systems. Retrieved September 25, 2019, from <http://www.zinco.pt/sistemas/extensivas/index.php>
- Marau Gonçalves, R. (2017). “*Coberturas Ajardinadas . A Importância do Substrato Técnico : Contribuição para o seu Uso*”, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa..
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K. K. Y., Rowe, B. (2007). “*Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services*”. *BioScience*, 57(10), 823–833. <https://doi.org/10.1641/b571005>
- Ouldboukhité, S., & Djedjig, R. (2012). “*Characterization of green roof components : Measurements of thermal and hydrological properties*”. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.024>
- Ouldboukhité, S. E., Belarbi, R., & Djedjig, R. (2012). “*Characterization of green roof components: Measurements of thermal and hydrological properties*”. *Building and Environment*, 56, 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.024>
- Peck, S. W., & Callaghan, C. (1999). “*Greenbacks from Green Roofs: Forging a New Industry in Canada*”. Prepared for: Canada Mortgage and Housing Corporation. Environmental Adaptation Research Group, Environment Canada. (January 1999).
- Peck, S. W., & Richie, J. (2009). “*GREEN ROOFS and the Urban Heat Island Effect*”. 45–48. Retrieved from <https://www.buildings.com/article-details/articleid/8620/title/green-roofs-and-the-urban-heat-island-effect>
- Pinto, C. I. (2014). “*Introdução às coberturas ajardinadas.*”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto
- QIU, G. yu, LI, H. yong, ZHANG, Q. tao, CHEN, W., LIANG, X. jian, & LI, X. ze. (2013).
-

- “Effects of Evapotranspiration on Mitigation of Urban Temperature by Vegetation and Urban Agriculture”*. *Journal of Integrative Agriculture*, 12(8), 1307–1315. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60543-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60543-2)
- QIU, G. yu, LI, H. yong, ZHANG, Q. tao, CHEN, W., LIANG, X. jian, & LI, X. ze. (2013). *“Effects of Evapotranspiration on Mitigation of Urban Temperature by Vegetation and Urban Agriculture”*. *Journal of Integrative Agriculture*, Vol. 12, pp. 1307–1315. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60543-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60543-2)
- Raji, B., Tenpierik, M. J., & Van Den Dobbelsteen, A. (2015). *“The impact of greening systems on building energy performance: A literature review”*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 610–623. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.011>
- Rinner, C., & Hussain, M. (2011). *“Toronto’s urban heat island-exploring the relationship between land use and surface temperature”*. *Remote Sensing*, 3(6), 1251–1265. <https://doi.org/10.3390/rs3061251>
- Rowe, D. B. (2011). *“Green roofs as a means of pollution abatement”*. *Environmental Pollution*, 159(8–9), 2100–2110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.029>
- Rowe, D. B., & Getter, K. L. (2006). *“The role of extensive green roofs in sustainable development”*. *HortScience*, 41(5), 1276–1285.
- 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*, 103, 682–703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- Santos, D. J. P. (2012). "Desempenho térmico de uma cobertura verde num edifício solar". Dissertação de Mestrado, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Aveiro.
- Shimming, H. (2012). *“Uma Breve História dos Jardins de Telhado”* - Heather Shimmin Photography. Retrieved September 9, 2019, from <http://www.heathershimmin.com/a-brief-history-of-roof-gardens>
- Susca, T., Gaffin, S. R., & Dell’Osso, G. R. (2011). *“Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs”*. *Environmental Pollution*, 159(8–9), 2119–2126. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.03.007>
- Tadeu, A., Simões, N., Almeida, R., & Manuel, C. (2019). *“Drainage and water storage capacity of insulation cork board applied as a layer on green roofs”*. *Construction and Building Materials*, 209, 52–65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.073>
- Thuring, C. E., & Dunnett, N. P. (2019). *“Persistence, loss and gain: Characterising mature green roof vegetation by functional composition”*. *Landscape and Urban Planning*. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.10.026>

LivingRoofs. (2019). "Intensive green roofs" Retrieved September 24, 2019, from <https://livingroofs.org/intensive-green-roofs/>

Vijayaraghavan, K. (2016). "Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 740–752. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>

Vijayaraghavan, K., & Raja, F. D. (2014). "Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: Plant growth experiments and adsorption". *Water Research*, 63, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.06.012>

Referências link:

https://www.masterhousesolucoes.com.br/wpcontent/uploads/2017/12/impermeabilizacao_liquida-650x393.jpg, 2019.

<https://www.lfambiental.com.br/imagens/manta-pvc.jpg>, 2019.

<http://pt.dywaterproofing.com/uploads/201815168/fiberglass-bitumen-membrane24591751230.jpg>, 2019.

<http://agricult.pt/coberturas-ajardinadas/>, 2019.

<https://silaco.pt/product-category/gravilhas-decorativas/>, 2019.

<https://www.leca.pt/produtos/agregados/>, 2019.

<https://pdf.archiexpo.com/pt/pdf-en/zinco-gmbh/zinco-product-list/66390-301235-7.html>, 2019.

<https://www.resitrix.com/wp-content/uploads/sites/3/2017/10/resitrix-gruendachaufbauten-nl.jpg>, 2019.

<http://www.zinco.pt/sistemas/intensivas/index.php>, 2019.

http://www.zinco.pt/sistemas/semi_extensivas/index.php, 2019.

<http://www.ipma.pt/pt/publicacoes/boletins.jsp?cmbDep=cli&cmbTema=pcl&cmbAno=2018&idDep=cli&idTema=pcl&curAno=2018>, 2019.

<https://huksefluxbrasil.com.br/produto/detalhe/albedometro-sra01>, 2019.

<https://www.itecons.uc.pt/>, 2019.

<https://huksefluxbrasil.com.br/produto/detalhe/albedometro-sra01>, 2019.

ANEXO A

Tabela 16: Custos referentes à construção de uma cobertura verde extensiva e principais variáveis que determinam esses custos. Adaptado de (H. Aziz, Z. Ismail, 2011).

	Componente	Custo	Notas e Variações
a)	Design e especificações	5 – 10% do custo total do projeto	O número de técnicos consultados depende do tamanho e complexidade do projeto.
b)	Administração do projeto e revisão do local	2,5 – 5% do custo total do projeto	O número de técnicos consultados depende do tamanho e complexidade do projeto.
c)	Cobertura com camada de proteção de raízes	90,59 €/m ² – 144,94 €/m ²	Inclui a remoção da cobertura existente e depende do tipo de cobertura a ser instalada, e da acessibilidade à cobertura.
d)	Sistema da cobertura verde (Isolamento térmico, sistema de drenagem e de retenção da água, camada filtrante, substrato técnico)	49,82 €/m ² – 99,65 €/m ²	Inclui a espessura da camada do substrato, o tipo de membrana impermeável e a dimensão do projeto.
e)	Vegetação	9,96 €/m ² – 28,99 €/m ²	Inclui a época do ano, o tipo de vegetação e a forma como é aplicada.
f)	Instalação	28,99 €/m ² – 77,91 €/m ²	Inclui o aluguer de equipamentos utilizados para transportar os materiais para o telhado, a dimensão e complexidade do projeto e técnicas de plantação utilizadas.
g)	Manutenção	11,78 €/m ² – 19,02 €/m ²	Inclui, a dimensão do projeto, o tempo de instalação, o sistema de irrigação e tamanho e tipo de vegetação.
h)	Sistema de irrigação	19,02 €/m ² – 38,95 €/m ²	Custo opcional, pois a cobertura pode ser irrigada manualmente. Este custo inclui o tipo de sistema utilizado.

ANEXO B

Tabela 17: Custos referentes à construção de uma cobertura verde intensiva e principais variáveis que determinam esses custos. Adaptado de (H. Aziz, Z. Ismail, 2011).

	Componente	Custo	Notas e Variações
a)	Design e especificações	5 – 10% do custo total do projeto	O número de técnicos consultados depende do tamanho e complexidade do projeto.
b)	Administração do projeto e revisão do local	2,5 – 5% do custo total do projeto	O número de técnicos consultados depende do tamanho e complexidade do projeto.
c)	Cobertura com camada de proteção de raízes	90,59€/m ² – 144,94€/m ²	Inclui a remoção da cobertura existente e depende do tipo de cobertura a ser instalada, e a acessibilidade à cobertura.
d)	Sistema da cobertura verde (Isolamento térmico, sistema de drenagem e de retenção da água, camada filtrante, substrato técnico, decks e passadiços)	144,94€/m ² – 289,88€/m ²	Inclui a espessura da camada do substrato, o tipo de membrana impermeável, tipo de deck e a dimensão do projeto.
e)	Vegetação	48,92€/m ² – 1947,64€/m ²	O custo depende unicamente do tipo e tamanho da vegetação utilizada.
f)	Sistema de irrigação	19,02 €/m ² – 38,95€/m ²	Inclui o tipo de sistema utilizado e a dimensão do projeto.
g)	Vedação	58,88€/m ² – 117,76€/m ²	Inclui o comprimento e tipo de vedação e a dimensão do projeto.
h)	Instalação	76,99€/m ² – 176,65€/m ²	Inclui o aluguer de equipamentos utilizados para transportar os materiais para o telhado, a dimensão e complexidade do projeto e técnicas de plantação utilizadas.
i)	Manutenção	12,23€/m ² – 19,48€/m ²	Inclui a dimensão do projeto, sistema de irrigação e o tamanho e tipo de vegetação usada.

ANEXO C

Tabela 18: Informação do teor em água e condutibilidade térmica à temperatura média de 10 °C.

Amostra	Condição: Seco			Condição: 23°C/50%		
	Massa g	Teor em água %	λ_{10} W/(m·°C)	Massa g	Teor em água %	λ_{10} W/(m·°C)
SR01	444,43	0	0,085	454,27	2,21	0,091
SR02	420,16	0	0,085	434,60	3,44	0,087
S03	436,00	0	0,084	447,94	2,74	0,089
S04	470,00	0	0,093	483,60	2,89	0,090
S05	341,10	0	0,091	355,00	4,08	0,086
S06	376,70	0	0,089	393,10	4,35	0,081
S07	378,17	0	0,082	390,30	3,21	0,089
S08	343,00	0	0,086	356,80	4,02	0,086
S09	391,30	0	0,081	402,80	2,94	0,077
S10	392,99	0	0,083	406,00	3,31	0,082
S11	411,34	0	0,088	432,50	5,14	0,088
S12	537,55	0	0,095	549,10	2,15	0,095
S13	494,02	0	0,093	505,50	2,32	0,091
S14	452,80	0	0,098	464,97	2,69	0,106
S15	599,52	0	0,101	610,14	1,77	0,097

Amostra	Condição: 23°C/80%			Condição: Saturado		
	Massa g	Teor em água %	λ_{10} W/(m·°C)	Massa g	Teor em água %	λ_{10} W/(m·°C)
SR01	458,88	3,25	0,093	899,36	102,36	0,230
SR02	441,15	5,00	0,090	877,61	108,88	0,213
S03	455,20	4,40	0,095	868,00	99,08	0,252
S04	486,88	3,59	0,082	814,68	73,34	0,296
S05	362,73	6,34	0,084	820,60	140,57	0,251
S06	401,27	6,52	0,093	955,74	153,71	0,244
S07	400,92	6,02	0,092	794,85	110,18	0,237
S08	397,75	15,96	0,088	823,11	139,97	0,241
S09	410,80	4,98	0,084	823,67	110,50	0,239
S10	415,08	5,62	0,082	1013,98	158,02	0,206
S11	439,57	6,86	0,087	839,32	104,05	0,236
S12	557,79	3,77	0,094	1012,15	88,29	0,246
S13	509,37	3,11	0,090	871,30	76,37	0,243
S14	471,24	4,07	0,095	1035,73	128,74	0,232
S15	617,11	2,93	0,086	1075,91	79,46	0,264