

Mariana Busano Pinto Ângelo

AVALIAÇÃO ACÚSTICA DE COMPONENTES QUE CONSTITUEM AS COBERTURAS VERDES

ACOUSTIC EVALUATION OF COMPONENTS
THAT COMPOSE GREEN ROOFS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pelo Professor Doutor António José Barreto Tadeu e pela Professora Doutora Julieta Maria Pires António

Coimbra, 7 de fevereiro de 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Mariana Busano Pinto Ângelo

AVALIAÇÃO ACÚSTICA DE COMPONENTES QUE CONSTITUEM AS COBERTURAS VERDES

ACOUSTIC EVALUATION OF COMPONENTS THAT COMPOSE GREEN ROOFS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Construções,
orientada pelo Professor Doutor António José Barreto Tadeu e pela Professora Doutora Julieta Maria Pires António

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 possam surgir

Colaboração Institucional



Coimbra, 07 de fevereiro de 2017

*“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar,
divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa
ou uma concha mais bonita do que as outras,
enquanto o imenso oceano da verdade
continua diante dos meus olhos.”*

— Isaac Newton —

À minha madrinha.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho teve o apoio do Portugal 2020 através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização no âmbito dos projetos “GreenUrbanLiving (POCI-01-0247-FEDER-003393)” e “Concepção e caracterização de coberturas verdes e fachadas vivas construídas com sistemas estruturados em cortiça natural expandida (POCI-01-0145-FEDER-016852 e PTDC/ECM-COM/5251/2014)”.

Ao Professor Doutor António José Barreto Tadeu e à Professora Doutora Julieta Maria Pires António, muito agradeço a excelente orientação, transmissão de conhecimentos e disponibilidade que me dispensaram ao longo da realização desta dissertação.

Ao engenheiro José Nascimento (ITeCons) e engenheiro David Tadeu (ITeCons), agradeço a preciosa ajuda na realização dos ensaios experimentais.

Agradeço aos meus companheiros desta jornada, Mónica, Sara, Maria do Rosário, Cristiana, Marília, Raquel Patrícia, Cátia, Carla, Isa, Beatriz, Courela, Diana, Faustino e ao Sr. Ricardo, por me terem ajudado a não perder o foco e a ver sempre a luz ao fundo do túnel. Nem sempre foi fácil, mas com o vosso apoio provei que o conceito de resiliência se aplica também na vida. Às minhas amigas do coração, Sandra, Ângela, Rita, Inês, Raquel, Vanessa e Ana, por despertarem em mim o melhor da minha essência, nos bons e nos maus momentos. Coimbra é uma lição. Segredos nossos, desta cidade que é a minha, levo-os comigo para a vida.

À minha família, Avós, Tios, Tias, Primos e Primosinhos, o meu obrigada por nunca terem deixado de acreditar e celebrarem comigo as vitórias. À Inês por todo o apoio.

Agradeço ao meu irmão Huguinho e à minha cunhada Armanda, por serem o meu porto seguro. O laço de irmão não se explica com palavras, espero sempre conseguir mostrar aos dois o quão fundamental é a vossa orientação e apoio em todos os campos da minha vida.

Aos meus pais, Gracita e Zezito o meu mais profundo agradecimento. É graças a vocês e à educação que me inculcaram que tudo foi possível. O vosso apoio, o vosso colo, a vossa paciência, o muito amor em cada dia deste trajeto conferiram-me o suporte fundamental para, juntos, chegarmos aqui. Obrigada do fundo do coração. Conseguimos!

RESUMO

Num mundo densamente urbanizado, a cimentação do conhecimento de materiais sustentáveis que contribuam para o conforto acústico, é fundamental. Um dos vários benefícios das coberturas verdes é a atenuação sonora no ambiente urbano. O substrato e a vegetação são os componentes das coberturas verdes que mais contribuem para a atenuação sonora. Essa contribuição advém das características intrínsecas de cada material, condições em que se encontra e disposição que lhe é conferida. Com efeito, ambos, devido à sua variabilidade, são os elementos que maior potencial possuem para serem alvo de estudos. Na presente dissertação, apresenta-se o trabalho de um estudo experimental em que foram analisadas as características de absorção sonora de dois substratos e dois tapetes vegetais para coberturas verdes. Foram realizados ensaios em tubo de impedância e em câmara reverberante. Os ensaios realizados em tubo de impedância, sob a incidência de ondas sonoras normais ao substrato, foram realizados fazendo variar vários parâmetros, a constituição, a espessura, o teor de humidade e a compactação, relativamente ao substrato e a influência da vegetação foi estabelecida através de ensaios sem e com vegetação, estando esta em várias fases do seu crescimento. Os ensaios em câmara reverberante, em condições de campo difuso, foram feitos com provetes de grandes dimensões onde se fizeram variar as componentes que os constituíam. Avaliou-se a absorção sonora do substrato e a influência da vegetação, em vários estágios do seu desenvolvimento natural. A investigação experimental permitiu concluir que o substrato com melhor desempenho ao nível da absorção sonora corresponde ao mais orgânico. O tapete vegetal que mais potencia a absorção sonora é o de *sedum* com herbáceas e gramíneas. Constatou-se que o elemento mais absorvente é o substrato e que quando a este é adicionado o tapete vegetal, o mais vantajoso é aquele que possui uma estrutura menos densa, numa fase de crescimento moderada.

PALAVRAS-CHAVE

cobertura verde, absorção sonora, trabalho experimental, tubo de impedância, câmara reverberante, vegetação, substrato, sustentabilidade

ABSTRACT

In a densely urbanized world, a foundation of knowledge of sustainable materials that contribute to acoustic comfort, is fundamental. One of the many benefits of green roofs is sound attenuation in the urban environment. The substrate and vegetation are the components of the green roofs that contribute the most to the sound attenuation. This contribution comes from the intrinsic characteristics of each material, the conditions in which it is found and the provision that is given to it. In fact, because of their variability, both are the elements that have the greatest potential to be studied. In this dissertation, it is presented the work of an experimental study in which the sound absorption characteristics of two substrates and two vegetal rugs for green roofs were analyzed. Impedance tube and reverberant chamber tests were performed. The tests performed in impedance tube under the incidence of normal sound waves to the substrate were performed by varying several parameters, the composition, the thickness, the moisture content and the compaction, regarding the substrate, and the influence of the vegetation was established through tests with and without vegetation, in several phases of its growth. The reverberant chamber tests under diffuse field conditions were made with large test pieces where the constituent components varied. The substrate sound absorption and vegetation influence were evaluated at various stages of its natural development. The experimental investigation allowed to conclude that the substrate with the best performance in terms of sound absorption corresponds to the most organic. The vegetative rug that best intensifies the sound attenuation is the one with *sedum* with herbaceous and grassy. The study also showed that the most absorbent element is the substrate and that when the vegetable mat is added, the most advantageous is the one which has a less dense structure at a moderate growth stage.

KEY WORDS

green roof, sound attenuation, experimental study, impedance tube, reverberant chamber, vegetation, substrate, sustainability

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract.....	iii
Índice Geral.....	iv
Índice de Figuras.....	v
Índice de Quadros.....	viii
Simbologia.....	ix
Abreviaturas e Acrónimos.....	x
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Organização da dissertação.....	4
2 Coberturas Verdes.....	5
2.1 História das coberturas verdes.....	5
2.2 Constituição das coberturas verdes.....	11
2.2.1 Vegetação.....	13
2.2.2 Substrato de Crescimento.....	14
2.2.3 Camada Filtrante.....	16
2.2.4 Camada Drenante.....	17
2.2.5 Camada de Proteção.....	17
2.2.6 Barreira de Raízes.....	18
2.2.7 Membrana de Impermeabilização.....	18
2.3 Tipos de coberturas verdes.....	19
2.3.1 Coberturas Extensivas.....	19
2.3.2 Coberturas Intensivas e Semi-intensivas.....	20
2.3.3 Coberturas Extensivas vs. Coberturas Intensivas.....	21
2.4 Vantagens das coberturas verdes.....	22
2.5 Absorção sonora.....	26
2.6 Estado da arte das coberturas verdes na área da acústica.....	27
3 Trabalho Experimental.....	30
3.1 Programa Experimental.....	30
3.2 Descrição das Amostras.....	32
3.2.1 Amostras do ensaio em tubo de impedância.....	33
3.2.2 Amostras do ensaio em câmara reverberante.....	35
3.3 Sistema Experimental (descrição dos sistemas onde foram realizados ensaios).....	36
3.4 Procedimento de ensaio.....	40
4 Apresentação e discussão de resultados.....	49
5 Conclusões e trabalhos futuros.....	62
Referências Bibliográficas.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - (a) Zigurate de Nanna, Cidade de Ur. (adaptado de HT@, 2007); (b) Zigurate de Nanna, na atualidade, pós reconstruções, Iraque. (retirado de H@, 2011).....	6
Figura 2.2 - Representação dos Jardins Suspensos da Babilónia (retirado de SH@, 2014).....	7
Figura 2.3 - (a) Casas de turfa Islandesas da antiguidade. (retirado de GM@,2016); (b) Casas de turfa islandesas na atualidade. (retirado de GM@,2016).....	7
Figura 2.4 - (a) Jardim do Palazzo Piccolomini.(retirado de PPP@, 2014); (b) Panorâmica do Palazzo Piccolomini. (retirado de TIT, 2016).....	8
Figura 2.5 - (a) Cobertura do edifício Willis Faber and Dumas Headquarters. (retirado de AJ@, 2016); (b) Fachada do edifício Willis Faber and Dumas Headquarters. (retirado de FP@, 2016).....	9
Figura 2.6 - Fachada do edifício Hundertwasserhaus. (retirado de MTS@, 2016).....	10
Figura 2.7 - (a) ETAR de Alcântara, Lisboa. (retirado de ANCV@, 2016); (b) Edifício Municipal, Trofa. (retirado de IGRA@, 2016); (c) Fundação Calouste Gulbenkian. (retirado de STI@, 2016); (d) Jardim das Oliveiras, Porto (retirado de CE@, 2016); (e) Moradia Particular, Vila Nova de Gaia (retirado de ANCV@, 2016); Casa das Amendoeiras, São Brás de Alportel. (retirado de ANCV@, 2016).....	11
Figura 2.8 – Representação da distribuição por camadas dos constituintes de coberturas verdes. (adaptado de BLHC@, 2015).....	12
Figura 2.9 - Representação detalhada por camadas de uma cobertura verde extensiva (Pittaluga, I. et al., 2011).....	20
Figura 2.10 - Representação detalhada por camadas de uma cobertura verde intensiva (Pittaluga, I. et al., 2011).....	20
Figura 2.11 - Representação detalhada por camadas de uma cobertura verde semi-intensiva. (Pittaluga, I. et al., 2011).....	21
Figura 2.12 - Cobertura verde extensiva (retirado LANDLAB@, 2016).....	21
Figura 2.13 - Cobertura verde intensiva (retirado L@, 2015).....	22
Figura 3.1 - Substratos de crescimento ensaiados: S1 (à direita) e S2 (à esquerda).....	32
Figura 3.2 - Tapetes vegetais ensaiados em maio: (a) V1 e (b) V2.....	33
Figura 3.3 - Tapetes vegetais ensaiados em julho: (a) V1 e (b) V2.....	33
Figura 3.4 - Fotografia das amostras S1 (à direita) e S2 (à esquerda), ensaiadas em tubo de impedância.....	34
Figura 3.5 - Fotografia da amostra S1 + V1 ensaiada em tubo de impedância.....	35
Figura 3.6 - Provetes de ensaio em câmara reverberante: (a) tabuleiro isolado; (b) tabuleiros na câmara reverberante; (c) colocação dos tabuleiros; (d) amostra de 12 m x 12 m; (e) amostra com tapete V1 em maio; (f) amostra com tapete V1 em julho; (g) amostra com tapete V2 em maio; (h) amostra com tapete V2 em julho.....	36

Figura 3.7 - Sistemas dos ensaios de absorção sonora: (a) tubo de impedância; (b) câmara reverberante (retirado de ITECONS@, 2017).....	36
Figura 3.8 - Constituintes de um tubo de impedância: (1) altifalante; (2) microfones; (3) amostra; (4) envolvente rígida (retirado de EA@, 2017).....	37
Figura 3.9 - Constituintes do sistema experimental de um ensaio em tubo de impedância: (1) tubo de impedância; (2) pulse; (3) amplificador.....	38
Figura 3.10 - (a) Câmara reverberante do laboratório de acústica do ITeCons, na fase de instalação dos provetes; (b) Colocação da parede de referencia de face “vidrada” em betão.....	39
Figura 3.11 - (1) Fonte sonora; (2) Microfones; (3) Interface de ligação dos cabos; (4) Termohigrómetro.....	40
Figura 3.12 - Suporte inferior do tubo de impedância.....	41
Figura 3.13 - Provete do ensaio 18.....	43
Figura 3.14 - Provete do ensaio 19.....	43
Figura 3.15 - Elementos difusos curvos instalados no interior da câmara reverberante.....	45
Figura 3.16 - Ensaio em câmara reverberante dos substratos S1 (à esquerda) e S2 (à direita).....	47
Figura 3.17 - Ensaio em câmara reverberante do substrato S1 com os tapetes vegetais, em maio, V1 (à esquerda) e V2 (à direita).....	47
Figura 3.18 - Ensaio em câmara reverberante do substrato S1 com os tapetes vegetais, em julho, V1 (à esquerda) e V2 (à direita).....	48
Figura 4.1 - Absorção sonora para incidência de ondas planas para condições originais de humidade: (a) substrato S1; (b) substrato S2.....	51
Figura 4.2 - Absorção sonora para incidência de ondas planas para condições originais de humidade: curvas dos ensaios dos substratos com 8 cm (a vermelho) e 12cm-11cm (a azul).....	51
Figura 4.3 - Absorção sonora para incidência de ondas planas após secagem em estufa: (a) substrato S1; (b) substrato S2.....	53
Figura 4.4 - Absorção sonora para incidência de ondas planas para condições secas: curvas dos ensaios dos substratos com 8 cm (a vermelho) e 12cm-11cm (a azul).....	53
Figura 4.5 - Coeficiente de absorção sonora para incidência de ondas planas antes e após secagem em estufa para as espessuras de 8, 10 e 12 cm: (a) substrato S1; (b) substrato S2.....	54
Figura 4.6 - Coeficiente de absorção sonora para incidência de ondas planas antes e após secagem em estufa nos ensaios 12 cm – 11 cm: (a) substrato S1; (b) substrato S2.....	55
Figura 4.7 - Absorção sonora para incidência de ondas planas dos ensaios com substrato S1 e tapete verde V1.....	56
Figura 4.8 - Absorção sonora para incidência de ondas de campo difuso dos ensaios com os substrato S1 e S2.....	57
Figura 4.9 - Absorção sonora para incidência de ondas de campo difuso dos ensaios com os substrato S1 e tapetes vegetais V1 e V2 em maio.....	58
Figura 4.10 - Absorção sonora para incidência de ondas de campo difuso dos ensaios com os substrato S1 isolado e S1 e tapetes vegetais V1 e V2.....	58
Figura 4.11 - Absorção sonora para incidência de ondas de campo difuso dos ensaios com os substrato S1 e tapetes vegetais V1 e V2 em julho.....	59

Figura 4.12 - Absorção sonora para incidência de ondas de campo difuso em câmara reverberante.....60

Figura 4.13 - Sobreposição dos resultados da absorção sonora em câmara reverberante e tubo de impedância para o substrato S1 e o tapete vegetal V1.....61

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Principais características que conferem ao substrato de crescimento as condições ideais para o desempenho numa cobertura eficiente (Vijayaraghavan, 2016).....	15
Quadro 3.1 - Programa experimental tubo de impedância.....	31
Quadro 3.2 – Programa experimental câmara reverberante.....	32
Quadro 4.1 - Quadro resumo dos resultados obtidos.....	61

SIMBOLOGIA

Letras maiúsculas latinas

Hz	Hertz
°C	Grau centígrado
A_1	Área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante vazia, em metros quadrados
A_2	Área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante com o provete, em metros quadrados
V	Volume da câmara reverberante vazia, em m^3
T_1	Tempo de reverberação da câmara vazia, em segundos
T_2	Tempo de reverberação da câmara com o provete, em segundos
A_T	Área de absorção sonora equivalente, em metros quadrados
S	Área do provete

Letras minúsculas latinas

dB	decibel
m	metros
cm	centímetros
mm	milímetros
kPa	kilo Pascal
c_1	velocidade de propagação do som no ar, em metros por segundo
m_1	coeficiente de atenuação devido à presença do ar, com a câmara vazia, em metros recíprocos
m_2	coeficiente de atenuação devido à presença do ar, com a câmara com o provete, em metros recíprocos
r	fator de reflexão de incidência normal

Letras minúsculas gregas

α	Coeficiente de absorção
α_s	Coeficiente de absorção sonora equivalente de um elemento absorvente plano
ϕ_r	Ângulo de fase do fator de reflexão normal

ABREVIATURAS e ACRÓNIMOS

B&K	Brüel & Kjær
CR	Câmara reverberante
DEC	Departamento de Engenharia Civil
FCTUC	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
GRLF	Coberturas Verdes e Fachadas Vivas (Green Roofs and Live Facades)
ICB	Aglomerado de Cortiça Expandida
ITeCons	Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade
LECA	Agregado Leve de Argila Expandida (Light Expanded Clay Aggregate)
PVC	Policloreto de Vinila
RGR	Regulamento Geral do Ruído
S1	Substrato Siro Mistura 086.00
S2	Substrato Siro Mistura 076.00
TI	Tubo de Impedância
UGS	Espaços Verdes Urbanos (Urban Green Space)
Unesco	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (United Nations Educational Scientific and Cultural Organization)
V1	Tapete verde de relva
V2	Tapete verde de <i>sedum</i> com herbáceas e gramíneas

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A engenharia, como ciência que é, encontra-se em constante evolução almejando a excelência e a otimização das suas práticas, respeitando os recursos disponíveis, não comprometendo as gerações vindouras. A engenharia civil tem evoluído nesse sentido, procurando responder ao estímulo do ideal da sustentabilidade com soluções capazes de corresponder também aos requisitos exigidos a nível estrutural, não estrutural, estético e económico.

O desenvolvimento do conhecimento na área da engenharia tem frequentemente uma implicação direta na natureza e nos recursos naturais. Nos nossos dias, a par com a evolução, existe também uma crescente preocupação com o respeito e preservação do meio ambiente. É neste âmbito que a sustentabilidade tem vindo a apresentar um franco desenvolvimento ao longo dos últimos anos. Desde o “Relatório de Brundtland: O Nosso Futuro Comum”, desenvolvido pela Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, em 1987, sob a alçada do primeiro-ministro norueguês Gro Harlem Brundtland, onde foi apresentado o conceito de sustentabilidade pela primeira vez, passando pela entrada em vigor do protocolo de Quioto, em 2005, muita pesquisa foi desenvolvida, existindo ainda muito por explorar, sendo porém ponto assente que é imperativo adotar soluções sustentáveis, amigas do ambiente, plausíveis economicamente e harmoniosamente integradas do ponto de vista urbanístico.

A existência de espaços verdes em meio urbano (UGS) é uma componente chave do planeamento urbano na Europa. Devido à multiplicidade de serviços que os UGS oferecem ao ecossistema, a sua existência nas cidades pode ser indicativa de uma elevada qualidade de vida. Por outro lado, podem também ser uma opção sugestiva de privilégio e desigualdade (Rutt e Gulsrud 2016). Assim sendo, levanta-se a questão da justiça ambiental que pretende uma distribuição mais igualitária. Esta preocupação surge a vários níveis, tais como político e social, sendo abraçada por ativistas, académicos, políticos, engenheiros, arquitetos e cada vez mais pelo cidadão comum.

A sustentabilidade como conceito e objetivo tem vindo a crescer nos últimos anos. O seu conceito é cada vez mais lato e possível de ser implementado e desenvolvido, graças ao

desenvolvimento tecnológico focado na temática e à crescente sensibilização para a preservação do ambiente. A consciencialização é um objetivo global, existindo incentivos que premeiam iniciativas que colocam as principais cidades europeias numa competição saudável para se tornarem “Cidades Verdes”. O “*European Green Capital Award*” é um exemplo disso, promovendo e reconhecendo o esforço das cidades em se tornarem melhores, sendo avaliadas as medidas tomadas e os objetivos a cumprir, em focos como a qualidade do ar, qualidade acústica do ambiente e existência de áreas urbanas verdes que incorporem o uso sustentável da terra, de entre um total de doze indicadores ambientais avaliados (EC@, 2016).

A utilização de coberturas verdes tem vindo a aumentar na construção sustentável, especialmente em centros urbanos com elevada densidade de construção. Este crescimento pode ser justificado pelas várias vantagens oferecidas por estes elementos construtivos. Diversos estudos têm sido realizados sobre os benefícios ecológicos e económicos das coberturas verdes. Entre os vários benefícios, enumeram-se os relacionados com o comportamento acústico. Quando comparados com outros tipos de sistemas de uso generalizado, esta poderá revelar-se uma solução competitiva, contribuindo para melhorar o ambiente acústico interior e exterior do edifício, devido às suas propriedades de isolamento a sons aéreos e de absorção sonora.

A qualidade acústica de um ambiente, interior ou exterior é uma característica amplamente valorizada, tanto em termos de conforto como em questões diretamente relacionadas com a saúde. O crescimento das fontes ruidosas em meio urbano tem provocado uma degradação da qualidade de vida das populações. Existe portanto, a necessidade de mitigar este efeito nocivo com estratégias que passam pelo controlo da emissão na fonte, a criação de barreiras físicas ou a existência de elementos absorventes que contribuam para um decréscimo da propagação do som. A exposição a níveis de intensidade de ruído elevados é causa de quadros patológicos, desde problemas auditivos traumáticos e provocados por fadiga, problemas do foro psicológico, que passam por stress e irritabilidade e também problemas fisiológicos, como perturbações do sono. Estas situações têm repercussões a vários níveis, tanto pessoal como profissional e é fundamental que sejam minimizadas e, se possível, evitadas. “A crescente consciencialização dos aspetos nocivos do ruído faz com que a acústica em edifícios mereça um tratamento cada vez mais cuidado e generalizado” (Tadeu et al., 2010).

O interesse em conhecer o comportamento acústico das coberturas verdes, tem vindo a aumentar, resultado do incremento da sua utilização na área da construção, motivado pela sensibilização da temática da sustentabilidade. É, também, importante uma avaliação mais detalhada, contemplando o comportamento acústico dos componentes que as constituem. Para

tal, a via experimental é o meio indicado para realizar este tipo de estudo. O desenvolvimento de meios analíticos e numéricos é muitas vezes complexo devido ao elevado número de variáveis que o comportamento acústico envolve (António e Tadeu, 2004). No caso de materiais de cariz natural, a reprodução física do material a avaliar pelo modelo torna-se um desafio. Desta forma, através de ensaios experimentais, existe uma maior liberdade em se fazer uma avaliação de cada um dos constituintes das coberturas verdes em separado, ou em pequenos grupos, o que se traduz numa maior fiabilidade dos resultados obtidos.

É neste contexto, atendendo à necessidade de promover o desenvolvimento do conhecimento nesta área em franco desenvolvimento e com grande importância para o futuro da Engenharia Civil, contribuindo para a validação e otimização da aplicação desta solução construtiva, que surge este trabalho de investigação sobre a avaliação acústica de componentes que constituem as coberturas verdes.

1.2 Objetivos

A presente dissertação insere-se no âmbito de dois projetos, um em co-promoção, “GreenUrbanLiving – Sistemas multifuncionais baseados em aglomerados de cortiça expandida para a construção de coberturas verdes e fachadas vivas” e um projeto FCT “Conceção e caracterização de coberturas verdes e fachadas vivas construídas com sistemas estruturados em cortiça natural”. Estes projetos visam a conceção, o desenvolvimento técnico, a prototipagem e a validação final de sistemas multifuncionais de coberturas verdes e fachadas vivas.

Os sistemas de coberturas e fachadas verdes atuais recorrem frequentemente a materiais sintéticos para suportar a vegetação e para garantir as funções de drenagem e retenção de água. Com estes projetos, pretende-se desenvolver um sistema mais sustentável, nomeadamente através da utilização de aglomerado de cortiça expandida (ICB) produzido a partir de resíduos de indústria.

A introdução destes elementos verdes no espaço urbano pretende aumentar o isolamento térmico, reduzir os níveis de ruído e retardar o escoamento de águas pluviais nos edifícios. No entanto, estas propriedades dependem do tipo de sistema, nomeadamente da natureza e da espessura das camadas, do tipo e fase de crescimento da vegetação, do tipo de substrato vegetal, do teor de água, entre outros parâmetros.

De entre os vários tópicos estudados nestes projetos destaca-se o estudo acústico das coberturas verdes. Na presente dissertação, o estudo vai focar-se na absorção sonora exibida por vários tipos de substratos e de vegetações para aplicação em coberturas verdes.

O trabalho de investigação desenvolvido avaliou a influência dos referidos sistemas para a diminuição do ruído exterior, através da determinação do coeficiente de absorção sonora, por via experimental, com recurso a uma abordagem laboratorial usando um tubo de impedância e uma câmara reverberante. Neste estudo, avaliaram-se a influência de diferentes espessuras e tipos de substratos e ainda de diferentes tipos de vegetação em várias fases de crescimento.

1.3 Organização da dissertação

A dissertação desenvolve-se ao longo de cinco capítulos. No capítulo 1 é feita a introdução às temáticas abordadas, ao trabalho de investigação desenvolvido e enunciadas as principais motivações e objetivos.

No capítulo 2 aprofunda-se o conceito de cobertura verde, em termos conceituais, tanto a nível do seu desenvolvimento ao longo do tempo, no mundo e em Portugal, como em termos técnicos referentes à sua constituição, abordando as vantagens já exploradas, apoiadas nos estudos científicos desenvolvidos na área.

No capítulo 3 são apresentados os detalhes da vertente experimental, em que tiveram lugar ensaios em tubo de impedância e em câmara reverberante, sendo feita a descrição da metodologia desenvolvida e a descrição das amostras ensaiadas.

No capítulo 4 tem lugar a exposição e análise dos resultados referentes ao parâmetro avaliado, a absorção sonora, através dos dois tipos de ensaios realizados.

Finalmente, no capítulo 5 são feitas as devidas considerações referentes às conclusões que advêm do estudo experimental e é feita a sugestão de trabalhos futuros que se mostrem pertinentes.

2 COBERTURAS VERDES

Ao longo da História, as coberturas verdes evoluíram como resposta às necessidades das civilizações, de acordo com as suas necessidades básicas e contexto social, cultural e ambiental em que se inseriam. A flexibilidade do desenho e as técnicas usadas foram melhoradas ao longo dos tempos e possuem, nos presentes dias, elevado potencial de desenvolvimento.

2.1 História das coberturas verdes

Com a evolução dos tempos muito mudou na Engenharia Civil. Esta ciência que hoje conta com estudos extensos, detalhados e multidisciplinares e se foca em termos como otimização, sustentabilidade, economia e segurança, foi em tempos uma prática empírica, em que os recursos usados eram os geograficamente disponíveis e o esforço físico dos trabalhadores era a ferramenta que transformava as ideias em realidade.

Muitas são as referências na literatura clássica acerca de antigos jardins em cobertura, sendo possivelmente os mais famosos, os conhecidos Jardins Suspensos da Babilónia. Devido à sua antiguidade, os registos deste marco histórico são vagos e muitas vezes baseados em relatos orais, sendo um objeto de estudo mais comum entre historiadores e arqueólogos, não existindo dados concretos sobre a sua conceção, mas podendo funcionar como fonte de inspiração para a engenharia e arquitetura modernas.

O desenvolvimento do conceito de cobertura verde como hoje o conhecemos, apenas foi possível mais recentemente, potenciado pelo desenvolvimento de novas técnicas e pelo uso de novos materiais que surgiram após a revolução industrial, no século XVIII. Os métodos mais ancestrais de construção de coberturas faziam muito uso de terra, pedra, colmo, palha e outros materiais afins que não conferiam nem a resistência, nem a durabilidade requerida para tal fim. Apenas com o desenvolvimento do betão como material de construção, que possibilitou o domínio da construção de coberturas planas, foi possível começar a explorar esta vertente como uma possível opção válida e proveitosa, além de estética. Já no século XX, anos 20, o arquiteto *Le Corbusier*, publica os cinco pontos que definem uma nova arquitetura, dando destaque ao “teto-jardim”, que abre uma nova dimensão para o edifício (Corbusier, 1923).

Devido à extensa amplitude temporal em que se desenvolve a história das coberturas verdes, serão de focados apenas os desenvolvimentos e marcos históricos mais importantes.

Theodore Osmundson, no livro *Roof Gardens*, indica como primeira referência histórica de jardins planeados pelo homem, num nível acima do solo, as *Zigurates* da antiga Mesopotâmia. Estes edifícios, de cariz religioso, terão sido construídos desde o quarto milénio até sensivelmente 600 A.C., sendo grandes pirâmides em pedra, com patamares na face exterior, onde se encontravam plantações de árvores e arbustos. Esta distribuição suavizava a escalada, possível através de enormes escadarias, oferecendo proteção ao agressivo clima quente da região que presentemente é o Iraque. A *Zigurate de Nanna*, apresentada na figura 2.1, é a mais preservada das antigas *Zigurates* tendo sido já alvo de várias reconstruções.



Figura 2.1- (a) *Zigurate de Nanna*, Cidade de Ur (adaptado de HT@, 2007); (b) *Zigurate de Nanna*, na atualidade, pós reconstruções, Iraque (retirado de H@, 2011)

O marco histórico mais famoso, que se enquadra nesta temática, é indubitavelmente aquele conhecido como os Jardins Suspensos da Babilónia, considerado uma das sete maravilhas do mundo antigo. Os jardins de vegetação exuberante, adornados com esculturas de deuses e cascatas, representados na figura 2.2, terão sido construídos, durante a reconstrução da Babilónia, ente 600 e 500 A.C. De acordo com Theodore Osmundson, a primeira referência acerca dos mesmos data de 290 A.C., cerca de 200 anos após a possível destruição dos mesmos. Supõe-se que os jardins seriam de base quadrangular com 30 metros de altura, em socalcos, sendo a cobertura executada com duas camadas de tijolo cozido ao sol, aplicando-se um recobrimento que impedia a humidade de penetrar na cobertura, finalizada com terra amontoada suficiente, de modo a permitir que grandes árvores enraizassem.



Figura 2.2 - Representação dos Jardins Suspensos da Babilônia (retirado de SH@, 2014)

Os “primeiros povos” e os vikings, limitados pelos recursos naturais e ferramentas básicas que possuíam, eram induzidos a improvisar edifícios que lhes proporcionassem abrigo aos elementos climáticos, com soluções passivas de aquecimento (Kubba, 2012). Para tal, a cobertura feita com elementos naturais, onde era possível o crescimento de plantas e relva, era bastante comum por forma a controlar a temperatura e a exposição solar. Na Islândia, no século IX, teve origem a tradição de cobrir os telhados com turfa por parte dos vikings. As casas de turfa islandesas (figura 2.3) são, de acordo com a *World Heritage List* da Unesco, únicas, no sentido em que são uma técnica usada por todas as classes económicas e em todos os tipos de edifícios. Originalmente, a estrutura do edifício era totalmente em madeira, com apontamentos em pedra, sendo a cobertura constituída por turfa, por vezes apoiada por chapas de ardósia. Este pioneiro exemplar de arquitetura vernacular, que se prolongou no tempo como uma tradição da região, sendo ainda hoje praticada, aliando-se a técnicas mais desenvolvidas, mereceu a nomeação para se tornar património da Unesco (WHC@, 2017).



Figura 2.3- (a) Casas de turfa Islandesas da antiguidade (retirado de GM@,2016); (b) Casas de turfa islandesas na atualidade (retirado de GM@,2016)

Na Europa, umas das épocas mais ricas em edificado emblemático são os períodos ligados ao Renascimento, Barroco e Romantismo. Os jardins de cobertura surgem durante esta época em edifícios ligados a famílias abastadas e personalidades importantes. Um dos primeiros jardins de que há registo data da Itália renascentista, do papado de Pio II, 1458 a 1464. No *Palazzo Piccolomini* existe um majestoso jardim que se confunde com a paisagem circundante, como se pode observar na figura 2.4. Este jardim possui um sistema de drenagem que encaminha a água da chuva evitando inundações nas galerias localizadas abaixo do jardim.



Figura 2.4- (a) Jardim do *Palazzo Piccolomini* (retirado de PPP@, 2014); (b) Panorâmica do *Palazzo Piccolomini* (retirado de TIT, 2016)

Após a revolução industrial, surgiu um novo leque de hipóteses relativamente aos materiais disponíveis. A produção em série, o surgimento de materiais compostos, ligas metálicas e o desenvolvimento dos meios de transporte contribuíram para que fosse possível uma construção mais moderna e diversificada, acessível a classes sociais mais generalizadas, não sendo exclusivo o uso de coberturas verdes por parte dos núcleos mais abonados, geralmente ligados ao clero e à realeza, como acontecia na antiguidade.

Já em pleno século XX, o betão revela-se o material de construção mais comum, devido à sua grande trabalhabilidade, baixo custo e características de alta resistência quando armado. Tornou-se assim possível a concretização de coberturas planas extensas capazes de suportar cargas elevadas, deixando espaço para que as coberturas verdes pudessem ter uma nova dimensão, quer em termos de área, quer em termos de diversidade de flora, quer ainda em termos de detalhes construtivos que lhes confirmam uma drenagem eficiente, bem como uma boa impermeabilização.

No decorrer deste século, a arquitetura tomou um novo rumo, influenciada pelos ideais de *Le Corbusier*. Até então, uma cobertura verde tinha uma relevância mais aleada à estética e à

simbiose entre o espaço urbano e o meio natural. Com esta nova corrente de pensamento, incita-se o despertar do contributo de um espaço com estas características em outros campos, dando-se destaque às várias vantagens ambientais que dele advêm, tornando-o num espaço útil do ponto de vista do utilizador. Começam então a surgir vários edifícios portadores de coberturas verdes, um pouco por todo o mundo, com especial destaque na Europa.

Em 1973, a propósito da crise energética que originou o embargo do petróleo nos Estados Unidos, foi desenvolvida uma nova forma de pensar por parte de alguns arquitetos mais iluminados e vanguardistas, conscientes da necessidade de criar alternativas que contornassem as questões ambientais que esta crise levantou. Este novo “movimento verde” teve inspiração em livros como *“Design with Climate”*, de Victor Olgyay, *“Form and Stability”*, de Ralph Knowles e *“Silent Spring”*, de Rachel Carson. Este alerta contribuiu para o despertar para uma nova era de projetos atentos à sustentabilidade, de entre os quais se destaca o *“Willis Faber and Dumas Headquarters”*, em Inglaterra, apresentado na figura 2.5, que possui uma ampla cobertura verde (Kubba, 2012).



Figura 2.5- (a) Cobertura do edifício *Willis Faber and Dumas Headquarters* (retirado de AJ@, 2016);
(b) Fachada do edifício *Willis Faber and Dumas Headquarters* (retirado de FP@, 2016)

Em finais do referido século, a sustentabilidade ganha uma dimensão mais formal e desenvolve-se a nível mundial. Assim, as coberturas verdes ganham uma nova força pois evidenciam várias vantagens que vão de encontro às novas demandas da construção sustentável. Quer em termos de legislação, quer em termos de consciencialização social tornam-se uma solução construtiva apelativa e exequível, integrando-se em vários âmbitos. Nesta fase, a maior dificuldade do uso de coberturas verdes prende-se com as dificuldades técnicas no isolamento dos edifícios em relação à infiltração de água e surgimento de patologias associadas à humidade. Destaca-se, de

entre vários edifícios datados desta época, um complexo habitacional na Áustria, apresentado na figura 2.6, o *Hundertwasserhaus*, construído em 1985, que conta com mais de 250 árvores na sua cobertura.



Figura 2.6 – Fachada do edifício *Hundertwasserhaus* (retirado de MTS@, 2016)

Avaliando a evolução das coberturas verdes, é evidente que ao longo da história existiu a necessidade e vontade de melhorar os projetos convencionais, no sentido da construção sustentável, podendo ser parte integrante do projeto original ou parte do processo de reabilitação de edifícios já existentes. As inspirações da antiguidade, aliadas às técnicas avançadas hoje disponíveis, possibilitam que as coberturas verdes sejam uma solução acessível a várias escalas, de modo a integrarem edifícios duradouros, eficientes a vários níveis, que contribuam para uma utilização saudável do ponto de vista do utilizador, respeitando o meio ambiente.

No presente, vários são os estudos que confirmam as vantagens das coberturas verdes. Os sistemas de impermeabilização existentes são bastante capazes, quando efetuados com competência, deixando este de ser um fator de desencorajamento aquando da decisão de investir neste elemento construtivo. “Uma cobertura verde bem-sucedida só é possível com um adequado projeto, uma perfeita instalação e devida manutenção” (ANCV@, 2016). Com efeito, esta solução é atualmente bastante encorajada, sendo obrigatória em legislações de alguns países. A Alemanha é um exemplo no que toca à utilização de coberturas verdes no seu edificado, oferecendo benefícios fiscais aos seus proprietários. Estima-se que nesta zona, o crescimento de área preenchida por coberturas verdes aumente cerca de 13.5 milhões de metros quadrados por ano, tendo já 10 por cento dos edifícios existentes esta tecnologia (Vijayaraghavan, 2016). Generalizando um pouco pelo globo, também a Áustria, Dinamarca, Itália, República Checa, Japão e Estados Unidos da América, entre muitos outros preveem

incentivos. Em Portugal, existem alguns exemplos de coberturas verdes, como as apresentadas na figura 2.7, sendo expectável o aumento da frequência da existência das mesmas.



Figura 2.7 – (a) ETAR de Alcântara, Lisboa (retirado de ANCV@, 2016); (b) Edifício Municipal, Trofa (retirado de IGRA@, 2016); (c) Fundação Calouste Gulbenkian (retirado de STI@, 2016); (d) Jardim das Oliveiras, Porto (retirado de CE@, 2016); (e) Moradia Particular, Vila Nova de Gaia (retirado de ANCV@, 2016); (f) Casa das Amendoeiras, São Brás de Alportel (retirado de ANCV@, 2016)

2.2 Constituição das coberturas verdes

A aplicação de uma cobertura verde pode ter várias motivações, que serão determinantes para a constituição da mesma. Estas podem ser de cariz estético, estabilização climática, conforto acústico, obrigatoriedade legislativa ou preocupação ambiental. Revelam-se particularmente úteis em zonas húmidas, com neve e climas temperados, sendo o seu potencial em climas secos um pouco mais limitado (António, 2015). Conforme as características pretendidas e de acordo com a zona em que se insere este sistema construtivo, alguns dos constituintes apresentam grande diversidade, enquanto outros são mais regulares.

Uma boa cobertura verde é constituída por várias camadas, cada uma com um propósito específico, que em conjunto, devidamente concebidas e aplicadas, sejam eficientes a vários níveis (Renterghem e Botteldoren, 2011). Deve sempre ter uma base estrutural forte, capaz de suportar devidamente a carga exercida e os acréscimos passíveis de ocorrer ao longo do tempo, fruto das oscilações climáticas e do adensamento da vegetação. A impermeabilização deve ser cuidadosamente aplicada, pois é complexa a localização e reparação de locais onde ocorram infiltrações após a colocação do substrato. É pois, um sistema composto que, além da sua

complexidade, devido ao facto de comportar um sistema vivo, requer cuidados contínuos que podem ser largamente minimizados através de uma instalação exigente e eficaz (António, 2015). A cobertura deve ser projetada e construída de modo a ter uma durabilidade semelhante à prevista para a impermeabilização do edifício.

Convencionalmente uma cobertura verde é constituída por 6 a 10 componentes individuais, dispostos em camadas, como se pode observar na figura 2.8. Em sentido descendente estará presente, em contacto com o ambiente, a vegetação assente no substrato de crescimento. Seguidamente encontram-se as camadas filtrantes, drenantes e de proteção. Existirá ainda uma barreira que confere proteção das raízes e finalmente a membrana de impermeabilização, podendo ainda optar-se por uma camada de isolamento.

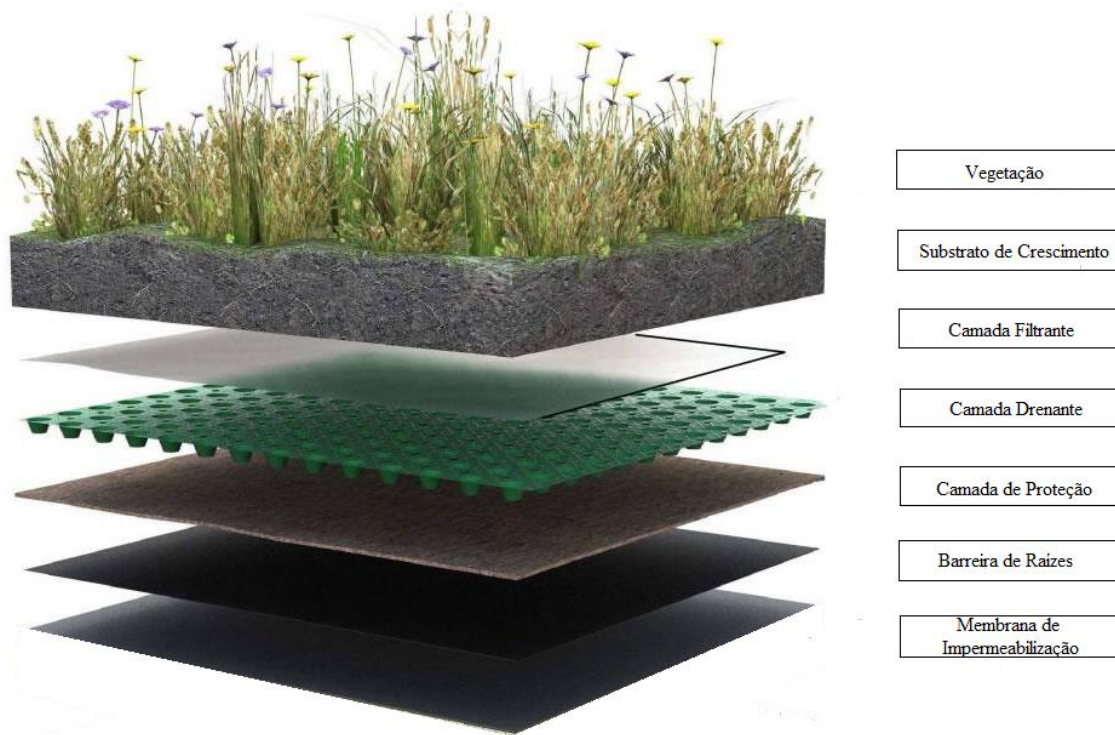


Figura 2.8 – Representação da distribuição por camadas dos constituintes de coberturas verdes (adaptado de BLHC@, 2015)

2.2.1 Vegetação

A camada mais superficial é constituída por vegetação, sendo este o elemento que confere à cobertura o facto de também poder ser chamada “cobertura viva”. O sucesso da cobertura verde, em termos das vantagens ambientais que oferece, está diretamente relacionado com a qualidade da flora que o integra. As plantas, por si só, auxiliam o escoamento da água, melhoram a qualidade do ar e potenciam um bom desempenho térmico (Vijayaraghavan, 2016).

Existe uma ampla variedade de espécies que oferece um desempenho adequado aos requisitos de uma cobertura com vegetação. No entanto, este meio apresenta limitações que influenciam a escolha, tais como o limite de carga suportada pela estrutura e a profundidade do substrato. O local e o clima em que se insere o edifício deve também ser um critério decisivo, sendo, sempre que possível, vantajosa a escolha de espécies autóctones.

Atendendo às condições extremas que a vegetação pode enfrentar numa cobertura, é expectável que os exemplares selecionados tenham a capacidade de superar condições de seca, de sobreviver com o mínimo de nutrientes possíveis, de cobrir uniformemente a área considerada, de se multiplicarem rapidamente, não necessitando de constante manutenção. Conforme a tipologia da cobertura, seguidamente explicada, o comprimento e rigidez das raízes pode também ser um fator importante aquando da escolha das espécies a plantar (Vijayaraghavan, 2016). Estes aspetos serão de menor importância sempre que a principal intenção da colocação da cobertura verde seja de índole estética, em que a manutenção contínua não seja um problema, podendo a escolha das espécies contar com uma variedade alargada.

Com efeito, a vegetação mais habitual são as suculentas. De entre os tipos existentes, o mais popular é o *Sedum*. Existente em várias zonas do mundo, sendo capaz de se adaptar com facilidade a vários tipos de clima, consegue desempenhar satisfatoriamente a totalidade das características pretendidas (Xiao et al., 2014). A confiança depositada nesta espécie advém da sua limitada transpiração e elevada capacidade de armazenamento da água em excesso, nas folhas e nos caules, o que lhe permite a sobrevivência em condições de seca. As suas raízes são curtas e tenras, sendo um fator importante, uma vez que não ocorre a penetração das mesmas no elemento estrutural, permitindo economizar na barreira contra raízes. Confere, também, uma satisfatória cobertura do substrato, que não deve estar exposto diretamente à luz solar e ventos fortes. Uma cobertura com abrangência vegetal uniforme apresenta menor crescimento de ervas daninhas e erosão do solo menos acelerada, fundamental especialmente em coberturas inclinadas (Vijayaraghavan, 2016).

As características da vegetação têm influência na resposta acústica deste sistema construtivo, influenciando a transmissão, absorção sonora e reflexão. A variância destes fenômenos dá-se de acordo com aspetos intrínsecos às espécies escolhidas, tais como a dimensão das plantas, da folhagem e das raízes, a par com a interação destas com o substrato de crescimento (Connelly, 2011).

2.2.2 Substrato de Crescimento

O substrato de crescimento é o constituinte da camada com maior volume de qualquer cobertura verde. As suas características são determinantes para o desempenho da mesma, tendo além dos seus atributos próprios, relação direta com o crescimento e viabilidade da vegetação. Assim, para um uso eficiente, há que fazer uma coordenação entre os objetivos que se pretende que a cobertura cumpra, os substratos disponíveis e o tipo de vegetação a usar, para que a cobertura seja otimizada como um todo.

Alguns benefícios expectáveis estão diretamente associados com as propriedades do substrato, entre eles, a capacidade de escoamento da água, o comportamento térmico e o acústico. É prática comum que o substrato seja uma mistura de vários componentes, sendo formulada de modo a cumprir o máximo das características de um substrato ideal, conforme o contexto em que será inserido. Comercialmente os substratos são desenvolvidos com os materiais disponíveis localmente, direcionados para um tipo de plantas, condições climáticas e nível de manutenção específicos. Da sua constituição podem constar materiais reciclados, o que os torna menos dispendiosos e mais sustentáveis. O uso de substratos não comercializados, ou direcionados para a jardinagem, é desaconselhável, pois tem desvantagens associadas, nomeadamente: deficiente retenção de água, pouco arejamento, elevado peso, potencial para o desenvolvimento de ervas daninhas, elevada capacidade de compactação e lixiviação de nutrientes (Vijayaraghavan, 2016).

Um substrato de crescimento ideal apresenta, entre as suas principais características: baixa massa volúmica aparente seca e saturada, quantidade de nutrientes mínima e adequada à vegetação, baixa percentagem de matéria orgânica, capacidade de retenção de água, porosidade capaz de proporcionar o arejamento, boa condutividade hidráulica, baixa lixiviação e elevada sorção. O substrato deve ainda ter a capacidade de suportar as raízes, conferindo um bom suporte às estruturas vivas. No quadro 2.1 encontram-se descritas as causas destas serem consideradas as características mais importantes bem como as articulações desejáveis entre características para otimizar o desempenho desta camada.

Quadro 2.1 – Principais características que conferem ao substrato de crescimento as condições ideais para o desempenho numa cobertura eficiente (Vijayaraghavan, 2016)

<p style="text-align: center;">Massa volúmica aparente seca e saturada</p> <ul style="list-style-type: none">•Influência no peso da cobertura verde.•Quanto maior a densidade, maior o peso.•O substrato é o elemento da cobertura verde que maior carga provoca.•Pode ser minimizada através do uso de materiais inorgânicos reciclados.•Quanto mais baixa, maior pode ser a camada de substrato, mais variedade de plantas.•Deve ser articulada com a estabilidade.
<p style="text-align: center;">Nutrientes</p> <ul style="list-style-type: none">•Evelada influência no crescimento e desenvolvimento saudável da vegetação.•Défice de micro e macro-nutrientes leva à deterioração das plantas.•Excesso de micro e macro-nutrientes potencia o crescimento de ervas daninhas.•Factor de maior importancia na manutenção das coberturas verdes.•Necessária articulação entre os nutrientes e a vegetação.
<p style="text-align: center;">Matéria orgânica</p> <ul style="list-style-type: none">•Influência na qualidade do substrato.•Excesso pode provocar contaminação.•Decomposição provoca retração do substrato.•Recomendável que a quantidade presente seja a mínima possível.
<p style="text-align: center;">Capacidade de retenção de água</p> <ul style="list-style-type: none">•Vital para o desenvolvimento e durabilidade das plantas.•Extremamente importante em condições de seca ou pico de cheia.•Tanto maior quanto maior e mais orgânica for a camada de substrato.
<p style="text-align: center;">Porosidade</p> <ul style="list-style-type: none">•Influência no desenvolvimento das plantas, pelo arejamento do solo.•Influência no bom funcionamento da cobertura, pela reduzida carga por volume.
<p style="text-align: center;">Condutividade hidráulica</p> <ul style="list-style-type: none">•Influência no desenvolvimento das plantas, pela quantidade de água disponível•Influência no bom funcionamento da cobertura, pela drenagem.
<p style="text-align: center;">Baixa lixiviação e elevada sorção</p> <ul style="list-style-type: none">•Influência no comportamento e reservas minerais.•A lixiviação reduz a quantidade dos minerais disponível.•A sorção contribui para o equilíbrio e retenção das moléculas minerais.
<p style="text-align: center;">Estabilidade</p> <ul style="list-style-type: none">•Fornece ancoragem às raízes.•Deve conferir um bom suporte, capaz de resistir a condições extremas.•A presença de compostos inorgânicos leves diminui a estabilidade.•Deve ser articulada com a densidade aparente.•Deve ser articulada com as espécies presentes e o clima em que se insere.

Na fase de projeto da estrutura em que irá integrar a cobertura verde, há que considerar os valores limites, para que seja feita uma avaliação pelo lado da segurança. Numa reabilitação, há que fazer a verificação da capacidade de carga. Assim, será importante considerar para efeitos de cálculo dos estados limites últimos e de serviço, a densidade aparente saturada (Xiao et al., 2014). Nas diretrizes para o planeamento, execução e manutenção para coberturas verdes FLL (FLL, 2002) os valores de quantidade de matéria orgânica recomendados são apenas de 4-8%, por volume, para coberturas com camada de substrato pouco profundo e 6-12%, por volume, para substratos com maior altura. De acordo com as mesmas diretrizes, a capacidade de retenção de água de um solo com bom desempenho apresenta um mínimo de 20%. Para a porosidade, os valores apresentados são superiores a 10% e maiores que 3600 mm/h para a condutividade hidráulica.

Todas estas características devem ser tidas em consideração, não sendo fácil a elaboração de um substrato que as contemple a todas. A baixa massa volúmica aparente, conseguida através do uso de constituintes leves, pode comprometer a estabilidade do substrato e a ancoragem das plantas. O uso de partículas pequenas e o aumento da matéria orgânica, como tentativa de aumentar a retenção de água, pode afetar a porosidade e a condutividade hidráulica (Vijayaraghavan, 2016). Para que se consigam ultrapassar estas dificuldades, é fundamental o desenvolvimento de estudos experimentais nesta temática, no sentido em que se otimize o substrato como um todo, para que seja capaz de corresponder às exigências que lhe competem.

Do ponto de vista acústico, o substrato pode ser definido como um material, que possui capacidade de absorção sonora (Connelly e Hodgson, 2015). O solo do substrato de crescimento tem de ter entre as suas características, uma porosidade adequada, por forma a permitir a penetração das ondas sonoras no mesmo, sendo então, genericamente, um solo granular o mais adequado. Pela interação entre o som e as partículas do substrato, ocorrendo atenuação, classificam-se este tipo de solos como meios acusticamente suaves (Renterghem e Botteldoren, 2009).

2.2.3 Camada Filtrante

Esta camada encontra-se diretamente abaixo do substrato de crescimento. Nela assentam as partículas granulares do solo, funcionando como uma barreira às partículas sólidas mas permitindo a passagem da água que escoar do solo. Evita, pois, que as partículas finas sejam lavadas do substrato, o que irá contribuir para a eficiência da camada de drenagem, reduzindo a hipótese de entupimento. Confere também algum efeito de barreira às raízes mais curtas e macias.

A constituição do filtro é, geralmente, fibra de poliéster ou polipropileno termosoldado. Convém que o tecido do filtro seja um não tecido leve e não biodegradável (Connelly, 2011). Espera-se que seja química e biologicamente neutro e simultaneamente um material resistente a vários níveis, altamente permeável, fácil e rápido de instalar. Deve conferir resistência a carga mecânica, a elementos ácidos e alcalinos naturais e a fenômenos de decomposição (Z@, 2017).

2.2.4 Camada Drenante

A camada drenante desempenha a função de encaminhar a água que escoar do substrato, quando saturado. Sendo a água o elemento externo que mais influência tem no desempenho da cobertura, a eficiência deste elemento é fundamental, restituindo ao substrato as condições aeróbicas ideais. Para um bom desenvolvimento, a vegetação requer um substrato arejado e conseqüentemente não saturado. Além do encaminhamento da água, este sistema constituído por pequenos reservatórios, contribui para a preservação da camada impermeabilizante e melhoramento do comportamento térmico da cobertura.

Este elemento é geralmente feito de plásticos de alta resistência e na sua forma possui pequenos compartimentos que armazenam água, permitindo simultaneamente a eliminação da que esteja em excesso. Pode também ser substituída, em coberturas de menor escala, por materiais granulares que possuam grande capacidade de condutividade hidráulica e porosidade suficiente para armazenar água, tais como agregados leves de argila expandida (LECA), xisto expandido, pedaços de tijolo, cascalho e lascas de pedra (Vijayaraghavan, 2016). Comumente recorre-se a compostos de polietileno reciclado e ao polistireno. Pretende-se que o sistema escolhido confira drenagem eficiente e retenção da água, seja biologicamente neutro e resistente a cargas (Z@, 2017).

2.2.5 Camada de Proteção

Esta camada confere proteção aos elementos mais próximos da estrutura. Protege a barreira anti raiz de danos mecânicos e é um obstáculo para a penetração das raízes, podendo, em coberturas cuja vegetação tenha raízes curtas e macias, ser suficiente para preservar a camada impermeabilizante. Será também vantajosa pois contribui para a retenção de água. A sua função principal é a proteção contra danos sobre a impermeabilização (Z@, 2017).

A manta sintética é, por norma, feita com fibras recicladas de alta qualidade de poliéster ou polipropileno. Deve ser resistente a ações mecânicas, ter capacidade de reter água e nutrientes, ser resistente à decomposição, ser biologicamente e quimicamente neutra e ser compatível com betuminosos (Z@, 2017).

2.2.6 Barreira de Raízes

A penetração de raízes na membrana de impermeabilização compromete a integridade da cobertura verde e da estrutura, como tal deve ser evitada. Os micro-organismos e as próprias raízes podem atacar e degradar os materiais usualmente constituintes da membrana de impermeabilização (Connelly, 2011). O seu uso é obrigatório nas coberturas em que o tipo de vegetação tenha raízes longas e rígidas, mas pode ser dispensado em coberturas em que o tipo de vegetação não tenha estas características (Vijayaraghavan, 2016).

Existem várias abordagens para controlar a penetração das raízes na membrana de impermeabilização. Pode ser feita a sobreposição à impermeabilização de uma camada solta e independente de termoplástico, com costura soldada ou sem costuras, pode ser aplicado um tecido soldado à camada de impermeabilização ou ainda ser usado um produto químico que iniba o crescimento de raízes (Connelly, 2011). O primeiro tipo geralmente é de polietileno de alta resistência e o segundo de poliolefina flexível. Pretende-se que sejam elementos que além da função anti raiz, sejam resistentes a ácidos húmicos, a elementos betuminosos, a poliestirenos e a petróleo, não sejam contaminantes para o meio ambiente, resistam a esforços de tração e tenham elevada durabilidade (Z@, 2017).

2.2.7 Membrana de impermeabilização

A membrana de impermeabilização encontra-se diretamente em contacto com a estrutura do edifício. É de extrema importância o sucesso da sua instalação, podendo comprometer o sucesso global da cobertura. Uma vez colocadas as camadas superiores, não será fácil efetuar reparações sem remover todas as outras camadas, portanto deve ser projetada de maneira a ter uma duração semelhante à da estrutura e ser da mais alta qualidade.

Devido à constante humidade que se faz sentir nas várias camadas da cobertura, a membrana deve ser elaborada num material estanque, preservando assim o edifício de infiltrações e fenómenos ligados à presença de humidade. As características da cobertura têm influência na escolha do tipo de impermeabilização, tal como acontece numa cobertura regular que não tenha o sistema de cobertura verde. Também o local, o clima e o ciclo de vida pode direcionar a escolha de entre: membranas líquidas aplicadas a quente, membrana betuminosa de duas camadas de estireno butadieno estireno modificado, membranas de uma camada de poliolefina térmica, de policloreto de vinila (PVC) ou de etileno-propileno.

2.3 Tipos de coberturas verdes

A vegetação, sendo a camada mais à superfície, a par com o substrato, são os principais indicadores que determinam a tipologia e caracterização da cobertura verde, pois é nestes que se verifica maior variabilidade em termos de materiais, espessuras e densidades. Dependendo da escolha das espécies e dos parâmetros associados ao local de instalação da cobertura, tais como o tipo de telhado e o clima em que se encontra, várias adaptações devem ser feitas entre estas duas camadas. Em particular, o tipo e a espessura do substrato devem ser articulados com o tipo de vegetação e esta, por sua vez, deve ser pensada considerando o clima e a resistência da cobertura em que se insere (Renterghem e Botteldoren, 2011). Também o tipo de utilização influencia a categorização da cobertura conforme esta seja acessível ou inacessível.

Existem dois tipos principais de coberturas verdes, as extensivas e intensivas, podendo ainda ser consideradas as coberturas semi-intensivas. A principal diferença é marcada pela profundidade da camada de substrato de crescimento. As coberturas extensivas possuem uma camada de substrato fina, capaz de suportar vegetações de crescimento moderado, que sejam tolerantes à exposição solar e à seca, tais como o *Sedum* e a relva. As coberturas intensivas, por sua vez, exigem que o substrato seja suficientemente profundo para que consiga proporcionar o desenvolvimento de espécies arbustivas e arbóreas. Estas são frequentemente conhecidas como “jardins de cobertura”, devido ao facto de se assemelharem ao jardim convencional (Renterghem e Botteldoren, 2008), sendo as semi-intensivas uma escala menor destas.

2.3.1 Coberturas extensivas

As coberturas verdes extensivas são de baixa manutenção, incorporando plantas auto semeáveis, tais como *Sedum*, ervas, musgos, flores de prado e relva. Estes tipos de plantas, adequadas a este sistema de cobertura, apresentando raízes pouco profundas, são originárias de condições secas e semi-secas ou com superfícies rochosas e exigem pouca ou nenhuma irrigação, fertilização ou manutenção. Geralmente são projetadas como sendo inacessíveis, exceto para ocasional manutenção (Connelly, 2011). A cobertura extensiva é composta por um substrato leve de crescimento, de solo devidamente formulado, com profundidade variável, inferior a 15 centímetros. A sua aplicação é feita sobre coberturas planas ou telhados com inclinação máxima de 40 por cento (António, 2015). Genericamente apresentam a disposição apresentada na figura 2.9.

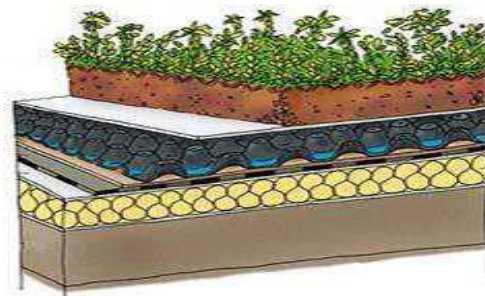


Figura 2.9 – Representação detalhada por camadas de uma cobertura verde extensiva (Pittaluga, I. et al., 2011)

2.3.2 Coberturas intensivas e semi-intensivas

Para que se possa efetuar a instalação de uma cobertura intensiva é necessário que exista uma adequada capacidade de suporte da carga que esta acarreta. Quando a estrutura o permitir, é possível criar verdadeiros jardins na cobertura do edifício. Este tipo pode então ser um ecossistema complexo que inclua relvados, prados, arbustos, árvores, lagos e superfícies em socacos, bem como elementos de cariz arquitetónico estético como bancos e esculturas. (António, 2015). A camada de substrato é de uma dimensão considerável, podendo variar dos 20 aos 200 centímetros. A larga variedade de vegetação que se pode desenvolver em coberturas com estas características requer elevada manutenção a nível de fertilização, rega e limpeza (Vijayaraghavan, 2016). Genericamente apresentam a disposição apresentada na figura 2.10.



Figura 2.10 – Representação detalhada por camadas de uma cobertura verde intensiva (Pittaluga, I. et al., 2011)

As coberturas semi-intensivas, como o próprio nome indica, assemelham-se às intensivas, mas com uma dimensão moderada. A camada de substrato de crescimento é intermédia, inferior a 20 centímetros, podendo acomodar pequenas plantas herbáceas, relva e pequenos arbustos. Não

representam um acréscimo de carga muito significativo, mas requerem manutenção frequente (Vijayaraghavan, 2016). Genericamente apresentam a disposição apresentada na figura 2.11.

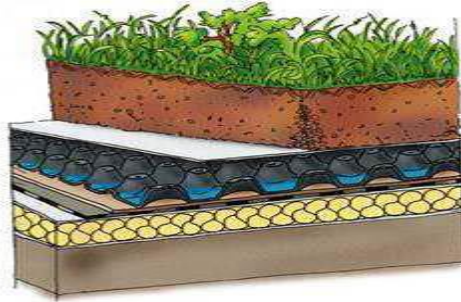


Figura 2.11 – Representação detalhada por camadas de uma cobertura verde semi-intensiva. (Pittaluga, I. et al., 2011)

2.3.3 Coberturas extensivas vs. Coberturas intensivas

As coberturas extensivas, tendo pouca restrição em relação ao seu peso, baixo custo e reduzida manutenção, são as mais comuns em todo o mundo (Vijayaraghavan, 2016). Dependendo do objetivo a desempenhar pela cobertura, em qualquer clima e tipo de construção, poucos serão os cuidados requeridos, podendo apenas ser necessário o suplemento de nutrientes. Em geral, são as menos dispendiosas de implementar e manter, sendo capazes de corresponder aos benefícios gerais que advêm da instalação de uma cobertura verde, ao mesmo tempo que apresentam elevada resistência e capacidade de auto propagação (FLL, 2002). A sua simplicidade natural torna-as facilmente integráveis a nível paisagístico, como se pode observar na figura 2.12.



Figura 2.12 – Cobertura verde extensiva (retirado LANDLAB®, 2016)

Por sua vez, atendendo às especificidades dos tipos de sistemas de coberturas verdes referidos, será compreensível que as coberturas mais dispendiosas são as intensivas. Tanto a nível de instalação e manutenção, passando pelos seus constituintes, não esquecendo o incremento estrutural para suporte da carga, trata-se de um sistema mais elaborado o que provoca mais movimentação de capital (Vijayaraghavan, 2016). É considerado um espaço com ocupação, logo requer a instalação de acessos, trilhos, iluminação e parapeitos (Connelly, 2011). No entanto, entre as vantagens que serão aprofundadas no subcapítulo 2.4, a nível estético e arquitetónico são bastante apelativas, sendo exemplo disso a cobertura apresentada na figura 2.13.



Figura 2.13 – Cobertura verde intensiva (retirado L@, 2015)

As coberturas semi-intensivas, podendo ainda ser criativas do ponto de vista da escolha da vegetação, apresentam menos variedade disponível, do que as intensivas. As plantas usadas e o substrato exigem menos da estrutura, sendo a sua instalação menos dispendiosa que a de uma cobertura intensiva (FLL, 2002).

2.4 Vantagens das coberturas verdes

Neste subcapítulo são descritas as vantagens das coberturas verdes. Podem ser diretas ou indiretas, de cariz ambiental, social, económico ou especificamente relacionadas com o utilizador do edifício. Vários estudos sobre coberturas verdes têm sido desenvolvidos. Nas publicações apresentadas sobre temática, ao longo da presente década, são unânimes as opiniões sobre as vantagens principais. Algumas das características importantes relacionam-se com os aspetos tecnológicos das coberturas verdes, pois estes são sistemas construtivos naturais e com elevado nível de adaptação. O seu *design* é flexível e pode ser concebido de modo a ser otimizado em função de um clima ou um contexto cultural específico. Os benefícios que apresentam são multifacetados e a tecnologia aplicada tem baixo impacto ambiental. Potenciam

o estímulo da integração e preservação da natureza em meio urbano, contribuindo para o aumento da preocupação ambiental global do ser humano (Connelly, 2011).

Em termos ambientais, as principais vantagens são ao nível do consumo de energia, do efeito de ilha de calor, da poluição do ar, da gestão de águas pluviais, da poluição sonora e da preservação do próprio meio natural.

A instalação de uma cobertura verde melhora o desempenho energético do edifício. Torna-o mais eficiente, reduzindo a variação da temperatura interior e o fluxo de calor pela cobertura, o que se reflete no decréscimo do consumo de energia tanto na estação de aquecimento quanto na estação de arrefecimento. A sua contribuição será tanto maior quanto pior for o isolamento térmico do edifício. Em climas quentes, o sombreamento conferido pela cobertura, evitando a incidência direta dos raios solares ajuda a diminuir a temperatura interna (Berardi et al., 2014). A poupança de energia conferida pela cobertura verde depende das espécies das plantas e da profundidade e tipo do substrato (Vijayaraghavan, 2016). O benefício na estação de arrefecimento é devido à evapotranspiração da água e ao facto das plantas reduzirem o efeito da incidência da radiação solar direta. Na estação de aquecimento as trocas de calor são minimizadas devido ao aumento de inércia térmica conferida pelas camadas do sistema de cobertura verde (Xiao et al., 2014).

A mitigação do efeito da ilha de calor é de extrema importância. As ilhas de calor são fruto da substituição de zonas verdes por estradas feitas com materiais betuminosos e betão e de edifícios, entre outras estruturas (António, 2015). Este fenómeno provoca o aumento da temperatura nas cidades. A elevada percentagem de superfície construída pelo homem, absorve os raios solares e liberta energia na forma de calor. Também a crescente emissão de dióxido de carbono proveniente de veículos e dispositivos de ar-condicionado potencia este efeito. Num mundo cada vez mais urbanizado, em especial nos países mais desenvolvidos, são evidentes os impactes provocados pela desflorestação e degradação da natureza e dos ecossistemas. O uso de coberturas verdes apresenta benefícios à escala da cidade (Berardi, U. et al., 2014). A existência de coberturas verdes em áreas urbanas, aumenta a evapotranspiração de água, o que leva a uma amenização do ambiente e conseqüente redução do gasto energético do edifício baixando a emissão de dióxido de carbono, uma vez que se vê diminuída a necessidade do uso de dispositivos de regulação térmica artificiais (Karteris et al, 2016).

A qualidade do ar é uma questão sensível, o que é compreensível, pois é um assunto vital para o ser humano. Em cidades em que os valores da poluição do ar se encontram perto dos limites apontados pela Organização Mundial de Saúde, a implementação de coberturas verdes pode ser uma solução que minimize este problema. A vegetação presente nas coberturas, especialmente

nas intensivas, pode substituir a que foi eliminada devido à densa percentagem de construção, contribuindo para a renovação do ar. O aumento da eficiência energética e a mitigação da ilha de calor contribuem de forma indireta para a redução da poluição do ar (Berardi, U. et al., 2014). As plantas conseguem absorver o ozono, o dióxido de nitrogénio, o dióxido de enxofre e partículas poluentes dispersas no ar (Karteris, M. et al, 2016). A contribuição das coberturas verdes é, pois, direta e indireta neste campo. A estrutura das plantas, como as folhas e os ramos filtram diretamente as partículas dispersas no ar. Indiretamente, pela redução da temperatura nas cidades, a presença das coberturas verdes ajuda à redução da produção de ozono na atmosfera (Renterghem e Botteldooren, 2008).

Quanto maior a percentagem de área construída numa cidade, maior é a percentagem de superfícies impermeáveis que a constitui. Desta forma, a superfície de uma cobertura verde, auxilia a gestão das águas pluviais, sendo esta considerada por vários autores a maior vantagem ambiental que confere (Berardi, U. et al., 2014). Devido à sua capacidade de absorção e armazenamento de água pode diminuir significativamente o pico de cheia, atrasando o tempo de escoamento inicial, libertando lentamente o excesso de água que fica armazenada na camada drenante (Karteris, M. et al, 2016). Vários estudos indicam que a capacidade de retenção de águas pluviais depende de variáveis tais como a profundidade do substrato, o tipo de vegetação e a duração e intensidade da chuvada (Henry e Frascaria-Lacoste, 2012). A água que chega à cobertura verde vai ser parcialmente absorvida pelo substrato e retida nos seus poros, sendo outra parte absorvida pelas plantas e transpirada de volta para a atmosfera e apenas a restante escoar, sendo encaminhada pela camada drenante (Vijayaraghavan, 2016).

Em termos de preservação ecológica e do ecossistema, uma cobertura verde é considerada um conjunto de materiais sustentáveis, a longo prazo, pois apesar de muitos deles serem de origem química, a contribuição da cobertura como um todo contrabalança os efeitos oriundos da produção dos mesmos. Sendo um meio natural, aumenta a biodiversidade pois reduz a escassez de habitats naturais (Berardi et al., 2014).

As coberturas verdes, em termos acústicos, contribuem diretamente para a melhoria da qualidade de vida do utilizador e para o ambiente em geral, através da mitigação do ruído. Possuem potencial para melhorar o comportamento acústico no interior e no exterior do edifício, através da capacidade de absorção e isolamento sonoro. Os materiais naturais constituintes deste sistema construtivo, colocados sobre materiais convencionais, que geralmente são refletivos, alteram significativamente o caminho das ondas sonoras, absorvendo-as e dissipando-as (Connelly e Hodgson, 2015). Através da absorção, possuem o potencial de reduzir a poluição sonora, um fenómeno recorrente nos nossos dias. Os elementos

mais poluentes a nível sonoro são os aviões, em termos de intensidade e os ruídos de locais industriais, mas comumente o ruído de tráfego é aquele que maior efeito nocivo provoca nas comunidades (Connelly, 2011). O substrato de crescimento normalmente utilizado possui propriedades absorventes. Sendo altamente poroso permite a penetração das ondas sonoras no meio natural. Devido ao elevado número de interações entre as ondas sonoras e a fase sólida do substrato, ocorre a atenuação (Renterghem e Botteldooren, 2011).

A nível económico, as vantagens passam pela preservação de materiais, redução de consumos energéticos, contribuição para um ciclo de vida mais sustentável, atribuição de pontuação ambiental (por exemplo sistema LEED) e incentivos económicos.

Uma cobertura tradicional está diretamente exposta às ações e variações climáticas. Em especial, as amplitudes térmicas provocam elevado desgaste do material. O substrato e a vegetação moderam a ação destas variações na estrutura, protegendo elementos como a membrana de impermeabilização, que desempenha uma função importantíssima na preservação do edifício (Renterghem e Botteldooren, 2008). Também a ação do vento e dos raios ultravioleta é minimizada na membrana de impermeabilização (Vijayaraghavan, 2016).

A crescente consciencialização acerca de questões ligadas à sustentabilidade leva a um aumento da procura de soluções deste tipo, aumentando o valor dos edifícios que as possuem. Este fator dissolve-se com o retorno devido às inúmeras potencialidades de exploração do espaço verde. Pensando em termos recreativos e de desenvolvimento de produtos naturais e orgânicos, estes espaços são frequentemente projetados como jardins para a comunidade, hortas urbanas, e espaços terapêuticos em edifícios ligados à saúde (Thomas, 2003). A vantagem do desempenho energético do edifício reflete-se em termos financeiros à escala do utilizador, que não necessitará de recorrer tão significativamente a sistemas artificiais para melhorar o conforto interior ou a qualidade do ar.

Socialmente os benefícios são consequência dos anteriormente descritos. O aumento da qualidade de vida do utilizador, a par com o embelezamento estético que este elemento natural devolve às cidades, potencia a calma e redução do nível de *stress* cada vez mais frequente na sociedade.

2.5 Absorção sonora

Segundo Tadeu et al. (2010, pp. 1.1) “o estudo acústico de um determinado local passa pela análise conjunta das fontes de produção de som, dos meios de propagação e dos elementos recetores. As fontes de produção de som podem-se distinguir pela sua potência, a forma como irradiam energia sonora e a sua descrição no domínio da frequência”. Sendo a produção de um som idêntica a uma perturbação de um determinado espaço físico, o restabelecer do equilíbrio do sistema provoca irradiação de energia, originando a propagação do som. A velocidade com que se propaga vai ser influenciada pelo meio e pela presença de obstáculos, variando conforme os seus materiais, por meio de fenómenos de reflexão, difração, transmissão e absorção sonoras (Tadeu et al., 2010).

Num mundo cada vez mais ruidoso, em que o desenvolvimento se reflete muitas vezes no crescente urbanizar dos meios naturais, existe a necessidade de encontrar soluções que minimizem este efeito. Neste sentido, sendo o principal afetado pelo aumento da poluição sonora, o cidadão residente em centros urbanos, existe a necessidade de melhorar o conforto acústico das comunidades em particular e da cidade como um todo. Para tal, a implementação de soluções que minimizem a transmissão de sons aéreos é fundamental. Este contexto motiva estudos nesta área, tais como a presente dissertação, para que se desenvolvam e validem soluções construtivas sustentáveis e eficientes que contribuam para a qualidade de vida do utilizador, respeitando o meio ambiente.

Uma das formas mais eficazes de minimizar o ruído passa pela edificação de barreiras físicas que alterem as características das envolventes dos edifícios, criando uma barreira acústica entre a fonte e o recetor (Tadeu et al., 2010). A normalização portuguesa e algumas normas europeias em vigor visam a prevenção e melhoria das condições de conforto acústico, centrando-se na medição do isolamento sonoro de edifícios e de elementos de construção. A atual legislação de ruído ambiente em Portugal é o Regulamento Geral do Ruído (RGR) aprovado pelo Decreto-lei nº 9/2007, de 17 de janeiro, retificado pela Declaração de Retificação nº 18/2007, de 16 de março, e alterado pelo Decreto-lei nº 278/2007, de 1 de agosto. O Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), publicado pelo Decreto-Lei nº 129/2002, de 11 de Maio e alterado e republicado pelo Decreto-Lei nº 96/2008, de 9 de Junho, identifica uma série de parâmetros acústicos regulamentares, que vão de encontro à crescente exigência acústica que se tem verificado no presente.

Entre as soluções disponíveis no mercado que interferem no comportamento acústico dos edifícios, encontram-se as coberturas verdes. De entre as várias vantagens conferidas por este

sistema, abordadas no subcapítulo 2.4, o comportamento acústico é favorável à mitigação do ruído através da sua capacidade de absorver o som.

A absorção sonora é um parâmetro que permite caracterizar acusticamente um material ou um sistema. Do estudo deste parâmetro poderá ser feita uma avaliação acerca da adequabilidade da solução conforme o desempenho desejado. A introdução de soluções verdes em meio urbano pretende uma redução dos níveis de ruído ambiente. Este objetivo relaciona-se com propriedades intrínsecas ao sistema, tais como a natureza dos materiais, a espessura das camadas, o tipo e a fase do crescimento da vegetação, o tipo do substrato vegetal, o teor de água, entre outros.

Este parâmetro é avaliado em termos do coeficiente de absorção (α). De acordo com (Tadeu et al., 2010) todos os materiais possuem a capacidade de absorver energia sonora, sendo esta propriedade variável em função das características intrínsecas ao material. O α é então a razão entre a energia sonora absorvida e a energia sonora incidente, considerado um determinado intervalo de tempo. Processa-se através do amortecimento das ondas sonoras que se propagam através dos materiais. No limite, o α assume valores entre 0 e 1, sendo o 0 correspondente a ausência de absorção e o 1 a absorção total.

Existem várias metodologias que permitem o seu estudo. No âmbito da presente dissertação, foram realizados ensaios experimentais com o intuito de o avaliar, por forma a caracterizar o comportamento acústico de componentes que constituem as coberturas verdes.

2.6 Estado da arte das coberturas verdes na área da acústica

A importância da acústica, aliada ao desenvolvimento da tecnologia, têm impulsionado o desenvolvimento de estudos experimentais que possibilitem um conhecimento aprofundado de novas soluções emergentes e que contribuam para potenciar as propriedades das soluções tradicionais. Sendo esta uma área tão vasta, que engloba estudos feitos desde a escala das cidades, dos edifícios ou de cada material em pormenor, apenas serão referenciados um reduzido número de exemplos que se enquadrem na temática da presente dissertação.

(Yang et al., 2012) estudaram os efeitos acústicos de sistemas de cobertura verde em estruturas de baixo perfil, ao nível da rua. São exemplos de estruturas com estas características parques automóveis subterrâneos, superficialmente revestidos com vegetação. Esta avaliação foi conduzida através da via experimental e simulação numérica em alguns casos selecionados. Alguns autores consideram que a instalação de um sistema de cobertura verde em estruturas

subterrâneas pode funcionar como uma barreira sustentável e inovadora para a redução do ruído de tráfego. Assim, o âmbito desta extensa avaliação conduzida por (Yang et al., 2012) baseia-se na exploração dos efeitos resultantes da variação de alguns parâmetros da cobertura relativamente à redução do ruído. Foram avaliados dois tipos de substrato: um denominado Zinco (nome comercial) e outro de base calcária. Os parâmetros avaliados incluem a estrutura do tabuleiro vazio, área, profundidade, tipo e posição do sistema representativo da cobertura verde e o tipo de vegetação. O sistema de cobertura verde foi recriado em tabuleiros plásticos de 600 mm x 400 mm x 280 mm. Os componentes de cada sistema incluem uma camada de drenagem de 30 mm no fundo do tabuleiro, uma membrana plástica a revestir as paredes do tabuleiro, uma camada filtrante de geotêxtil e o respetivo substrato. O substrato Zinco foi avaliado com profundidades de 50 mm e 100 mm, em 20 tabuleiros de cada altura. O substrato calcário foi testado com a profundidade de 100 mm, em 18 tabuleiros. Posteriormente para avaliar a influência da vegetação, foi feita a plantação, em cada um dos tabuleiros, de 9 espécies nativas de vegetação, que não se desenvolveram como desejado para serem consideradas como parâmetro variável. Desta forma, alternativamente, foram colocadas folhas recentemente colhidas para simular o efeito de uma vegetação densa e algodão para simular uma condição extrema de absorção sonora, podendo assim prosseguir os ensaios. Ambas as camadas tinham aproximadamente 120 mm. A avaliação do coeficiente de absorção do substrato foi feita em câmara reverberante e tubo de impedância. Na câmara semi-anecoica, a fim de simular uma estrutura subterrânea ao nível da rua, os sistemas foram colocados sobre caixa com 1200 mm de altura. Foram feitos ensaios para obtenção do nível de pressão sonora. Ensaíram-se a estrutura dos tabuleiros, várias configurações da disposição dos 3 tipos de tabuleiros elaborados, variando assim a área e a profundidade, a posição dos tabuleiros e finalmente os sistemas com a vegetação. O efeito da variação da geometria foi examinado usando o método dos elementos finitos (FEM) usando *Comsol*. Os resultados relativos à variação de área indicam que a atenuação do nível de pressão sonora aumenta, em geral, em função do aumento do número de filas de tabuleiros, embora haja também variações devidas à geometria. A variação da atenuação entre os tabuleiros apenas revestidos com uma membrana plástica e após a introdução dos substratos pode ser de até 9.5 dB em algumas frequências. Considerando os parâmetros avaliados, o efeito da variabilidade da profundidade e tipo de substrato são os menos significativos, quando comparados com os resultados em que se fez variar a configuração do sistema. A introdução da vegetação conferiu resultados positivos na mitigação do som acima dos 4000 Hz.

Theodore Van Rentegehem e Dick Botteldooren conduziram vários estudos ao longo dos últimos anos acerca do comportamento acústico em coberturas e fachadas verdes. Através de abordagens numéricas e experimentais são vários os estudos que apresentaram acerca da

mitigação de ruído com recurso a soluções naturais. De entre esses destacam-se a “Avaliação numérica da propagação do som sobre coberturas verdes” (Renterghem e Botteldooren, 2008), onde usando o método das diferenças finitas no domínio do tempo, foi conduzido um estudo em coberturas intensivas e extensivas. Usaram modelo *Zwicker and Kosten* para simular a propagação do som na camada do substrato. Os resultados positivos, relativamente a coberturas rígidas, foram principalmente observados em bandas de oitava com frequências centradas entre os 500 e os 1000 Hz. No caso das coberturas extensivas o pico de atenuação mais pronunciado verifica-se com a variação da profundidade do substrato, ocorrendo com um máximo de 10 dB, relativamente a coberturas rígidas, para a banda de oitava de 1000 Hz. Na análise da profundidade máxima para uma cobertura extensiva, compreendida entre 15 e 20 cm, no geral, existe uma satisfatória eficiência deste tipo de cobertura. As análises em substratos superiores a 20 cm, associados à tipologia de cobertura extensiva, não mostraram efeitos positivos resultantes do aumento da altura de substrato. Noutro estudo (Renterghem et al., 2013), avaliaram o potencial da envolvente viva em edifícios contribuir para ambientes mais silenciosos. Através da combinação de metodologias numéricas de ondas 2D e 3D estudaram o efeito em sistemas vegetais em paredes, coberturas verdes, em telas vegetadas no limite exterior de telhados e combinações destas soluções, sendo este estudo focado na propagação do ruído de tráfego em zonas sem incidência direta, como pátios interiores. Os resultados mostraram que as coberturas verdes têm o maior potencial acústico relativamente aos fatores considerados. É também interessante salientar que o estudo indica que a combinação das várias soluções resulta num resultado conjunto menos eficiente do que os efeitos em separado adicionados linearmente.

(Renterghem et al., 2015) fizeram uma revisão de formas de redução da propagação do ruído de tráfego ao ar livre, através de meios naturais. As ideias apresentadas foram testadas em laboratório, avaliadas numericamente e também obtidas com ensaios in-situ. Várias soluções cujo desempenho acústico foi estudado foram referidas, entre estas: barreiras com superfície vegetada, gabiões, faixas de vegetação de árvores e arbustos e bermas de terra. Os autores concluíram que a escolha da solução adequada depende fortemente do contexto, seja este rural ou urbano, do espaço disponível para a implementação da solução e da posição do recetor. Salientam ainda várias vantagens do revestimento vivo em edifícios, adiantando ser muitas vezes esta a única forma de aumentar a vegetação em centros urbanos densamente construídos. Além dos benefícios sociais, ambientais e económicos apontam estas soluções como acusticamente eficientes na redução do ruído ambiente.

3 TRABALHO EXPERIMENTAL

A revisão bibliográfica, apresentada no capítulo 2, revela a importância do desenvolvimento da temática da utilização de materiais sustentáveis no âmbito da engenharia civil. Sendo este um objetivo geral, existe a necessidade de validar, em particular, os aspetos em que este tipo de solução será vantajoso. Tanto a nível de conceção, como de desenvolvimento técnico, os sistemas multifuncionais de coberturas verdes e fachadas vivas (GRLF), apresentam elevado potencial para que sejam objeto de estudo.

É com este intuito que surge o presente trabalho de investigação onde se apresenta o estudo do comportamento acústico de componentes que constituem as coberturas verdes, por meio de uma análise experimental detalhada. O parâmetro objeto de estudo foi a absorção sonora. Foram avaliados dois substratos, ensaiados em câmara reverberante e em tubo de impedância. Aos substratos foram adicionados tapetes vegetais que foram ensaiados em várias fases do seu desenvolvimento.

3.1 Programa experimental

Os ensaios experimentais decorreram no laboratório de acústica do Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade (ITeCons). O programa experimental consistiu na determinação laboratorial do coeficiente de absorção sonora em tubo de impedância e ensaios laboratoriais de medição da absorção sonora em câmara reverberante. O objeto dos ensaios foram dois tipos de substratos de crescimento (S1 e S2) e dois tipos de vegetação (V1 e V2).

Os substratos foram ambos ensaiados segundo a norma de ensaio ISO 10534-2:2001 no tubo de impedância, para um diâmetro do tubo correspondente a 100 mm. Fez-se cada substrato variar em espessura, nível de compactação e teor de humidade. Os substratos foram secos em estufa a 70° até atingirem massa constante. Realizaram-se ensaios para alturas de substrato de 8 cm, 10 cm e 12cm para o diâmetro de 100 mm. A variação do nível de compactação foi feita a partir dos 12 cm, até aos 11 cm. Por cada espessura de substrato e teor de humidade em estudo

foram realizadas 4 repetições, de modo a obter uma melhor correlação dos resultados, tentando-se conferir repetibilidade a cada amostra, perfazendo um total de 32 ensaios para a determinação do coeficiente de absorção sonora de cada um dos substratos. Foi também feita a avaliação de um conjunto de substrato com vegetação, para avaliação da influência da vegetação e respetiva fase de crescimento, com apenas um dos substratos. Para uma espessura de substrato de 75 mm fizeram-se ensaios sem vegetação e com vegetação com as alturas de 125 mm e 50 mm. No Quadro 3.1 é apresentado o programa de ensaios experimentais realizado no âmbito deste estudo.

Quadro 3.1 - Programa experimental tubo de impedancia

Ensaio	Substrato	Vegetação	Repetições	Condições de condicionamento	Diâmetro (mm)	Espessura (cm)
1	S1	----	4	Original (humidade 7.3%)	100 mm	8
2						10
3						12
4						12-11
5	S2	----		Original (humidade 4.2%)		8
6						10
7						12
8						12-11
9	S1	----		Seco		8
10						10
11						12
12						12-11
13	S2	----		Seco		8
14						10
15						12
16						12-11
17	S1	----	Original	7.5		
18		V1(125)		7.5		
19		V1(50)		7.5		

Para os ensaios em câmara reverberante executaram-se sistemas representativos de coberturas verdes que foram sujeitos a medições dos tempos de reverberação no interior da câmara reverberante, sem a presença e com a presença da amostra a ser ensaiada. Foram avaliados os dois tipos de substrato isoladamente e conjuntos de substrato com vegetação com apenas um dos substratos e as duas vegetações em análise, separadamente, em distintas fases de crescimento, em maio e em julho. Seguiram-se os procedimentos da norma NP EN ISO

354:2007 usando o método do ruído interrompido. Assumiram-se 3 posições do microfone e 4 posições da fonte sonora, registrando 3 decaimentos para cada situação, perfazendo um total de 36 medições para cada amostra. No quadro 3.2 é apresentado o programa de ensaios experimentais realizados na câmara reverberante.

Quadro 3.2 - Programa experimental câmara reverberante

Ensaio	Substrato	Vegetação	Posição do microfone	Posição Fonte sonora	Decaimentos
1	S1	----	3	4	3
2	S2	----			
3	S1	V1(maio)			
4	S1	V2(maio)			
5	S1	V1(julho)			
6	S1	V2(julho)			

3.2 Descrição das amostras

No estudo experimental foram ensaiados dois tipos de substratos de crescimento e dois tipos de vegetação. Como foi salientado no capítulo 2.3, existem dois tipos principais de coberturas, sendo as mais comuns, as extensivas. Os materiais alvo do estudo foram escolhidos e dispostos de encontro com as especificidades desta tipologia de cobertura verde. Os substratos são constituídos por húmus, turfa, argila expandida (LECA) e rocha vulcânica. O substrato designado por S1 comercialmente designado por “Siro Mistura 086.00” é mais orgânico, apresentando cerca de 74% de matéria orgânica na sua constituição. O substrato S2, comercialmente conhecido por “Siro Mistura 076.00”, tem menor percentagem de matéria orgânica, sendo esta apenas de 14%. A figura 3.1 apresenta uma fotografia dos dois substratos.



Figura 3.1 – Substratos de crescimento ensaiados: S1 (à direita) e S2 (à esquerda)

Os tapetes vegetais, utilizados para a análise da influência do elemento vegetal numa cobertura verde, foram de duas espécies distintas. Uma das mantas verde é constituída por relva e denomina-se V1, a outra integra *Sedum* com herbáceas e gramíneas e é denominada V2. A nível de estrutura são distintos, pois V1 apresenta uma vegetação mais densa e com menor altura que o tapete V2. Numa primeira fase de crescimento, correspondente ao mês de maio, apresentam o aspeto evidente na figura 3.2. Posteriormente, em julho, é evidente o desenvolvimento das mesmas, na figura 3.3.



Figura 3.2 – Tapetes vegetais ensaiados em maio: (a) V1 e (b) V2



Figura 3.3 – Tapetes vegetais ensaiados em julho: (a) V1 e (b) V2

3.2.1 Amostras do ensaio em tubo de impedância

Sendo o material a ensaiar natural e granular, em termos de dimensões, as amostras correspondem às modeladas pelo tubo de impedância. Em todas as amostras tentou-se conferir

um padrão de reprodutibilidade da amostra, tentando encontrar um equilíbrio e distribuição constantes de partículas grossas e finas para que este não se tornasse um fator que influenciasse os resultados. Devido à dificuldade de conseguir amostras representativas do substrato com diâmetros de 29 mm (diâmetro menor do tubo de impedância) apenas se ensaiaram amostras com um diâmetro de 100 mm. Para simplificar a descrição das amostras, fez-se a correspondência do tipo de ensaios acima descritos no quadro 3.1, com o número que aí lhe corresponde. Fizeram-se ensaios para 3 espessuras de substrato, para cada um dos materiais em análise: 8 cm (ensaio 1, 5, 9, 13), 10 cm (ensaio 2, 6, 10, 14) e 12 cm (ensaio 3, 7, 11, 15). Procedeu-se também a um ensaio correspondente à simulação do efeito de compactação do substrato, sendo aqui feita variar a espessura do substrato de 12 para 11 centímetros (ensaio 4, 8, 12, 16), pois, para a espessura em questão, manualmente foi a compactação conseguida. Inicialmente, nos ensaios 1 a 4, foi usado o substrato S1, diretamente do saco que se encontrava no laboratório. A amostra tinha um teor de humidade de cerca de 7.3%. Também nos ensaios 5 a 8, o material, substrato S2, foi retirado do saco, com as condições originais de humidade de 4.2%. Para a realização destes ensaios, foi recolhida, de cada um dos respetivos sacos, uma amostra representativa do material, tendo sido sempre a mesma nos ensaios em que o parâmetro a variar foi a espessura.

Posteriormente, as amostras em questão foram sujeitas a um condicionamento em estufa a 70°C, até obtenção de massa constante e foram ensaiadas novamente, correspondendo os ensaios 9 a 12 para o solo S1 e 13 a 16 para o substrato S2. Na figura 3.4, apresenta-se uma fotografia do aspeto das amostras.

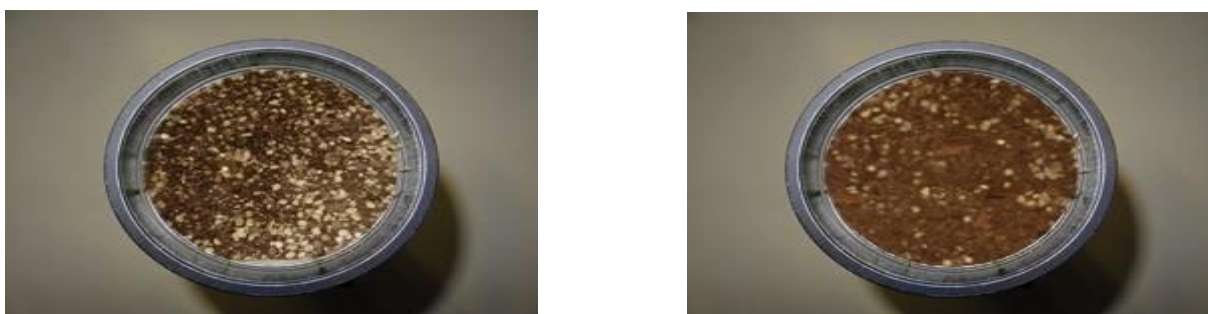


Figura 3.4 – Fotografia das amostras S1 (à direita) e S2 (à esquerda), ensaiadas em tubo de impedância

Finalmente, para análise do conjunto substrato + vegetação, foi recolhida uma amostra do substrato S1, ensaiada para uma espessura de 7.5 cm (ensaio 17), a mesma espessura ensaiada em câmara reverberante. Posteriormente, colocou-se, sobre o substrato com espessura de 7.5

cm, o tapete vegetal V1, relva, com 125 mm de altura (ensaio 18). Modificou-se ainda esta amostra, aparando-se a relva até uma altura de 50 mm, ensaiando-se novamente (ensaio 19). As amostras com relva apresentam o aspeto apresentado na figura 3.5.



Figura 3.5 – Fotografia da amostra S1 + V1 ensaiada em tubo de impedância

3.2.2 Amostras do ensaio em câmara reverberante

A câmara reverberante do ITeCons possui um volume de 200 m³, portanto, este tipo de ensaio mobilizou um volume de material bastante elevado. Para agilizar os procedimentos, de colocar e retirar as amostras da câmara, foram efetuados provetes constituídos pelos materiais a analisar dispostos em tabuleiros de 1 m x 1 m (ver figura 3.6 (a)). Para facilitar o transporte, os tabuleiros foram colocados sobre paletes de madeira que se mantiveram durante os ensaios. Os ensaios foram efetuados com 12 tabuleiros no interior da câmara, dispostos da forma apresentada na figura 3.6 (d), não paralelos às paredes da câmara, tendo pois o conjunto dos provetes um total de 12 m². Estes foram colocados de modo a que o conjunto dos 12 tabuleiros formasse um retângulo 3 m x 4 m.

Inicialmente foram ensaiados isoladamente os dois substratos (ensaio 1 e 2 do quadro 3.2), tendo sido posteriormente adicionado o tapete vegetal apenas ao substrato mais orgânico, o S1 (ensaio 3 e 4 do quadro 3.2). Este ensaio teve lugar em maio e posteriormente deixou-se desenvolver naturalmente a vegetação até novo ensaio, em julho (ensaio 5 e 6 do quadro 3.2).

Os tabuleiros são de aço inox e cada um tem dimensões de 1 m x 1 m, com uma altura de 12.5 cm. Os substratos foram ensaiados com uma espessura de 7.5 cm, nos ensaios com e sem o tapete verde. Na figura 3.6 apresenta-se um acompanhamento fotográfico do processo de instalação das amostras e o aspeto das mesmas nas várias fases acima descritas.

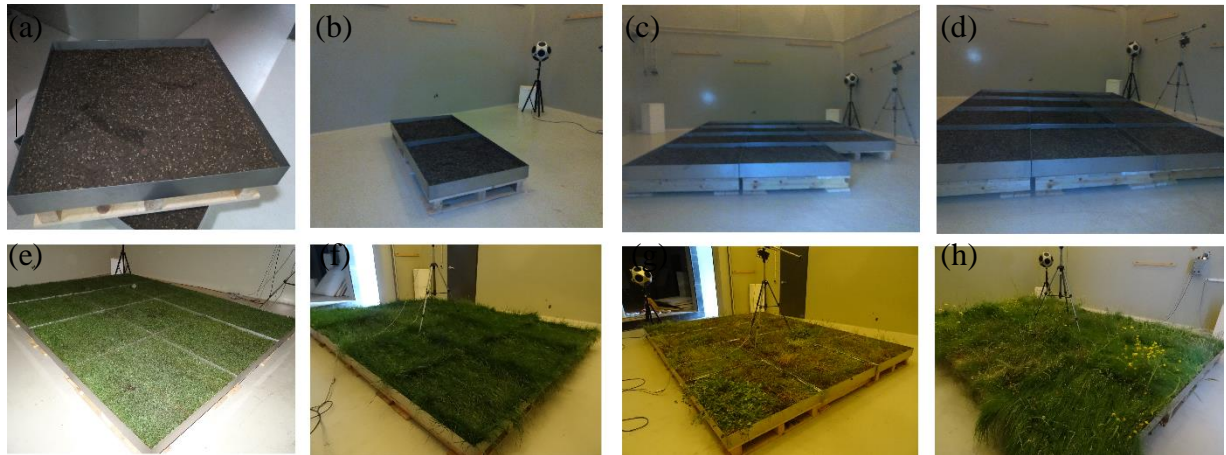


Figura 3.6 – Provetes de ensaio em câmara reverberante: (a) tabuleiro isolado; (b) tabuleiros na câmara reverberante; (c) colocação dos tabuleiros; (d) amostra de 12 m x 12 m; (e) amostra com tapete V1 em maio; (f) amostra com tapete V1 em julho; (g) amostra com tapete V2 em maio; (h) amostra com tapete V2 em julho

3.3 Sistema experimental (descrição dos sistemas onde foram realizados ensaios)

Os procedimentos experimentais de absorção sonora tiveram lugar em tudo de impedância e em câmara reverberante. O tubo de impedância foi instalado na vertical, no laboratório de acústica do ITeCons, onde também decorreram os ensaios em câmara reverberante (figura 3.7).

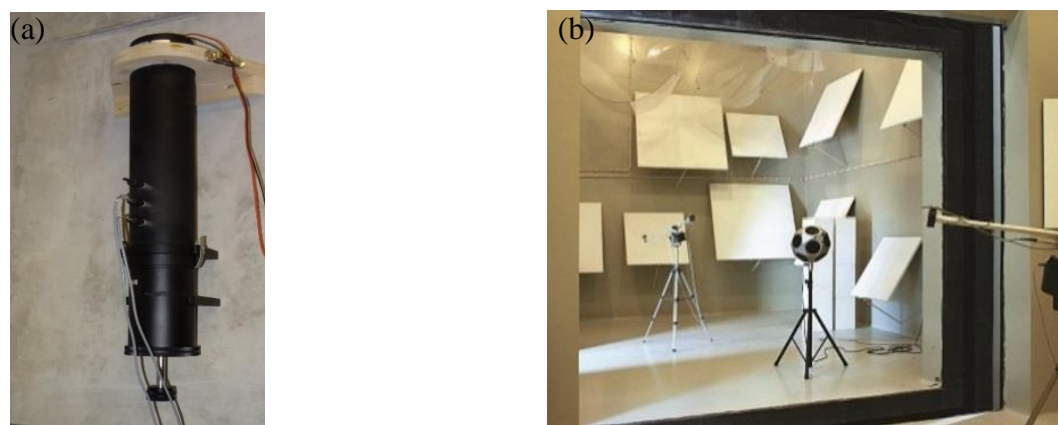


Figura 3.7 – Sistemas dos ensaios de absorção sonora: (a) tubo de impedância; (b) câmara reverberante (retirado de ITECONS@, 2017)

O tubo de impedância utilizado é um tubo metálico, da marca *Brüel & Kjær* (B&K) e modelo 4206-T (ver figura 3.9 (1)), instalado na vertical, através de uma estrutura em madeira aparafusada à parede, que permite o encaixe da parte superior do tubo, suportando-o. Esta disposição do tubo, que geralmente é operado na horizontal, é devida à natureza solta dos materiais a ensaiar. As amostras não são rígidas nem de forma constante, logo, seria de extrema dificuldade manter a amostra dentro do tubo, sem afetar a integridade da mesma aquando do processo de encaixe na horizontal. De forma esquemática, a composição do sistema correspondente ao tubo no seu interior é a apresentada na figura 3.8.

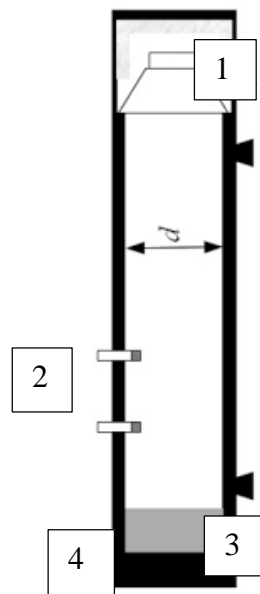


Figura 3.8 – Constituintes de um tubo de impedância: (1) altifalante; (2) microfones; (3) amostra; (4) envolvente rígida (retirado de EA@, 2017)

Para verificar o funcionamento do tubo de impedância na vertical, foi ensaiado um provete de referência com o tubo na horizontal e na vertical e verificou-se que não houve alteração dos resultados. No interior do tubo existe um altifalante com o propósito de gerar ondas planas com incidência normal à amostra e dois microfones B&K do tipo 4187 com pré-amplificador B&K do tipo 2670.

O tubo de impedância encontra-se ligado a dispositivos da marca B&K compostos por um sistema de aquisição multianalisador Pulse (modelo 3560-C) e um amplificador de potência (modelo 2716-C), apresentados na figura 3.9. A recolha, processamento e visualização de dados são efetuados por meio de um programa computacional especializado, o B&K, modelo 7758,

que permite a sua posterior exportação para análise em *softwares* como o *Microsoft Excel*, usado no âmbito da presente dissertação.

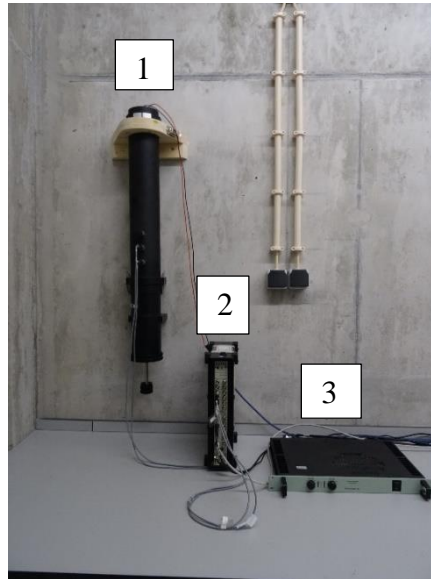


Figura 3.9 – Constituintes do sistema experimental de um ensaio em tubo de impedância: (1) tubo de impedância; (2) pulse; (3) amplificador

É usado um calibrador acústico para verificação dos microfones. Também se usou um termómetro, com uma classe de exatidão de 0.5°C e um barómetro, com uma classe de exatidão de 0.5 kPa , integrados neste sistema.

O compartimento de câmara reverberante do estudo experimental é uma das câmaras reverberantes do laboratório de acústica do ITeCons que possui um volume de cerca de 200 m^3 , apresentado na figura 3.10 (a). Aquando da realização do ensaio, esta encontrava-se selada por uma parede de referência de face “vidrada”, de betão armado, apresentada na figura 3.10 (b).

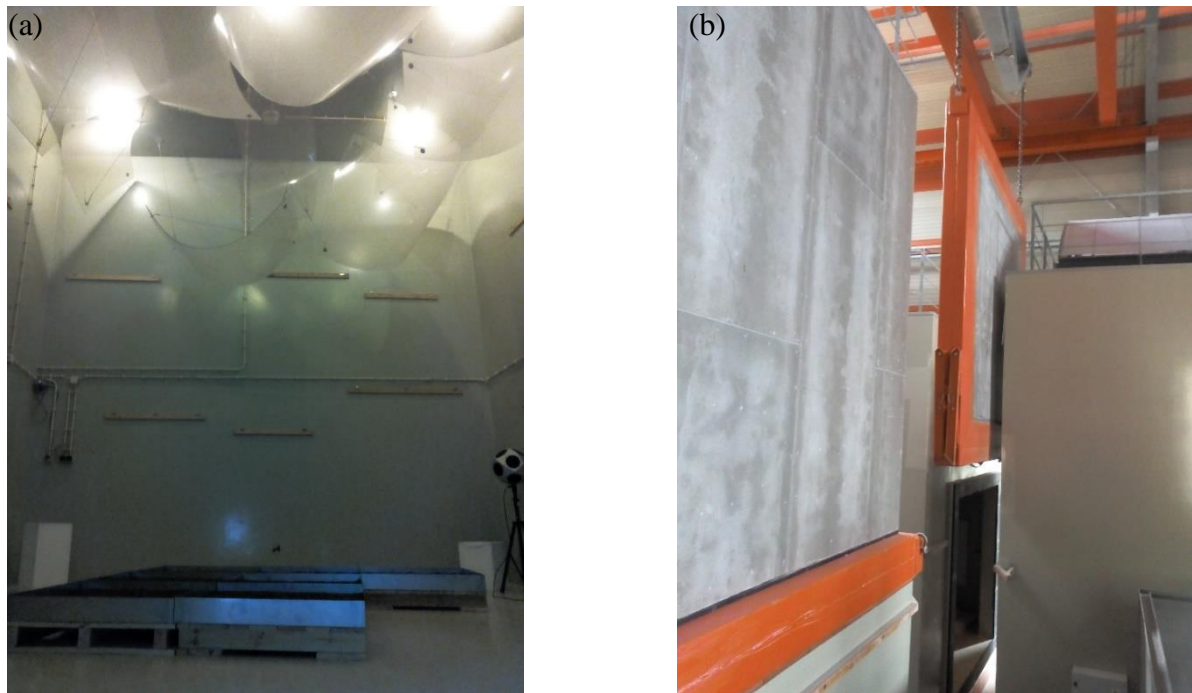


Figura 3.10 – (a) Câmara reverberante do laboratório de acústica do ITECons, na fase de instalação dos provetes; (b) Colocação da parede de referencia de face “vidrada” em betão

A fonte sonora, Omnipower 4292 B&K (ver figura 3.11 (1)), é constituída por vários altifalantes, de modo a garantir um campo sonoro uniforme e omnidirecional. Esta fonte sonora emite ruído contínuo de banda larga, com diferenças de pressão sonora entre bandas de 1/3 de oitava adjacentes inferiores a 6 dB.

O equipamento para medição do nível de pressão sonora é constituído por microfones do tipo 4190 da B&K (ver figura 3.11 (2)), que cumprem as condições definidas na norma de ensaio. Para calibrar os microfones existe um calibrador acústico tipo 1.

Tanto a fonte sonora quanto os microfones estão ligados a um sistema multianalisador pulse (ver figura 3.11 (3)) correspondente ao modelo 3560-C B&K, que permite a receção, análise dos resultados obtidos e posterior exportação dos dados para a ferramenta de tratamento de dados, *Microsoft Excel*, usada na presente dissertação.

Consta ainda do sistema um termohigrómetro (ver figura 3.11 (4)) conferente de uma classe de exatidão de $\pm 1^\circ\text{C}$ e $\pm 5\%$ de humidade relativa.

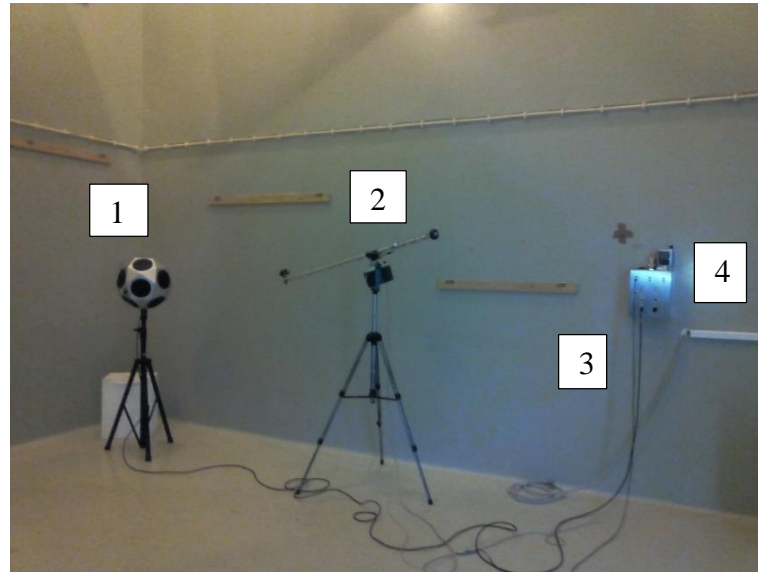


Figura 3.11 – (1) Fonte sonora; (2) Microfones; (3) Interface de ligação dos cabos; (4) Termohigrômetro

3.4 Procedimento de ensaio

Os ensaios em tubo de impedância foram realizados de acordo com a norma EN ISO 10534-2:2001. Os resultados deste ensaio advêm da determinação do r , fator de reflexão de incidência normal. O *software* usado calcula funções de transferência entre os microfones do sistema de ensaio. O coeficiente de absorção sonora para este tipo de ensaio, em que a incidência das ondas, que são planas, é normal ao provete é pois:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (1)$$

Previamente à execução dos ensaios, foi calculada uma curva de correção, de onde se obtém um fator corretivo, necessário para que os ensaios sejam válidos.

Para que as condições dentro do tubo fossem estáveis, antes de cada ensaio, ligou-se a fonte emissora, emitindo ruído por um curto período de tempo contínuo. Foram então medidos os valores de temperatura e pressão atmosférica dentro do tubo.

Em geral, os provetes descritos no subcapítulo 3.2.1 encaixaram perfeitamente no suporte de amostras, como foi anteriormente evidenciado, devido à natureza granular e não homogênea do

material ensaiado, não existindo folgas. A superfície do provete ficou perpendicular ao eixo do tubo de impedância, em todos os ensaios.

Foi sempre feito um conjunto de 4 repetições em cada tipo de ensaio, sendo a amostra retirada e colocada novamente no tubo de impedância entre cada um destes quatro ensaios, tentando-se imprimir ao ensaio alguma reprodutibilidade.

Para o ensaio 1 a 4 foi usado o substrato S1, nas condições em que se encontrava quando foi recolhido do saco dispensado para a realização do estudo experimental, localizado no ITeCons. Foi recolhida uma quantidade de substrato sensivelmente superior à correspondente à suficiente para preencher o volume máximo do provete considerado, salvaguardando-se possíveis desperdícios na execução dos ensaios, ou alteração significativa aquando o condicionamento. A partir desta amostra, conduziram-se os ensaios 1 a 4 e após o condicionamento, os ensaios 9 a 12. Inicialmente, ensaiou-se a menor espessura, tendo-se regulado a régua do êmbolo do suporte inferior do tubo de impedância para os 8 cm. Introduziu-se com uma colher metálica, substrato suficiente para preencher o interior da extremidade inferior do tubo de 100, apresentado na figura 3.12, até à altura desejada. Após a realização das 4 repetições estipuladas em concordância com a norma de ensaio, realizaram-se os mesmos procedimentos para as alturas de 10 cm e 12 cm de igual forma.



Figura 3.12– Suporte inferior do tubo de impedância

Para o estudo deste material, nestas condições, fez-se ainda um conjunto de ensaios com compactação. Para tal, colocou-se o êmbolo na posição correspondente a 12 cm, encheu-se o tubo com o substrato S1 até ao limite superior do tubo. De seguida, comprimiu-se o substrato

até que este ocupasse o volume correspondente à posição do êmbolo movida 1 cm para cima, fazendo-se efetivamente então a deslocação do êmbolo para que a superfície do provete se mantivesse perpendicular ao eixo do tubo e sem folgas. Fizeram-se as repetições sempre retirando a amostra do interior do tubo e movendo o êmbolo após a compactação.

Nos ensaios 5 a 8 foi usado o substrato S2, igualmente nas mesmas condições do respetivo saco existente no mesmo laboratório e selecionado em quantidade suficiente para a bateria de ensaios desejada. Estes em tudo foram semelhantes aos descritos nos parágrafos anteriores, tendo apenas sido feitos com outro tipo de substrato.

Após a realização dos ensaios iniciais aos substratos S1 e a S2, levaram-se as amostras para condicionamento em estufa a 70°C até atingirem massa constante. Foi então repetido todo o procedimento descrito para o substrato S1, nos ensaios 1 a 4, mas desta feita com o substrato S1 seco. Fizeram-se novamente os ensaios para as profundidades de 8 cm, 10 cm e 12 cm. Também a situação de compactação foi de novo avaliada, sendo escolhida a mesma altura de compactação de 11 cm. Para cada variação de parâmetro foram feitas 4 repetições.

Novamente para o substrato S2 cumpriram-se os ensaios em concordância com o procedimento executado para o outro substrato em análise. Estes ensaios correspondem aos 13, 14, 15 e 16.

Os ensaios correspondentes ao número 17, 18 e 19 foram realizados combinando a presença do substrato S1 e do tapete vegetal V1. Foi recolhida uma amostra do substrato ao natural, diretamente do saco armazenado no laboratório do ITeCons e foi ensaiada no tubo de impedância para uma espessura de 7.5 cm, a mesma que foi usada nos provetes do estudo que teve lugar na câmara reverberante (ensaio 17). Cumpriram-se as 4 repetições retirando e colocando de novo a amostra no tubo.

Colocou-se a relva com uma altura de 125 mm sobre o substrato. Ensaiou-se o provete que tinha o aspeto apresentado na figura 3.13. Este provete tinha na sua constituição substrato S1 com 7.5 cm e relva (tapete V1) com 125 mm de crescimento (ensaio 18). Fizeram-se 4 repetições, retirando cuidadosamente o conjunto do tubo de impedância e recolocando-o no seu interior entre cada repetição.



Figura 3.13 – Provete do ensaio 18

Para finalizar o estudo, fez-se um corte na relva, reduzindo a sua altura de 125 mm para 50 mm, ficando o provete com a configuração apresentada na imagem da figura 3.14. A altura de substrato manteve-se, repetindo-se os passos do procedimento feito para a altura de relva maior.



Figura 3.14 – Provete do ensaio 19

A gama de frequências a analisar depende do diâmetro do tubo considerado. O estudo experimental efetuado, com um tubo de 100 mm, centrou-se na gama de frequências compreendidas entre 100 Hz e 1600 Hz. O programa de ensaios inicial previa execução de estudos também para o diâmetro de 29 mm. No entanto, fizeram-se alguns testes e foi verificado que, devido ao tipo de material a ensaiar, o diâmetro mais pequeno não possibilitava a elaboração de provetes representativos do material. A falta de repetibilidade fruto da natureza granular do substrato, com diferentes tamanhos de partículas e constituintes, levaram a que

estes resultados, dotados de uma enorme variabilidade, não tenham sido considerados elegíveis para análise e exposição.

O tubo de impedância com diâmetro de 29 mm permitiria analisar a gama de frequências de 500 Hz a 6300 Hz, contemplando uma gama mais alta. No entanto, devido aos obstáculos que encontram no seu percurso, as componentes de frequências mais elevadas do som, em princípio já sofreram reflexões e difrações que poderão não permitir que cheguem à cobertura. Assim, as componentes do som mais prováveis de provocar interação com os constituintes das coberturas verdes, são uma gama de frequências mais baixas, fruto do ruído de tráfego e do ruído ambiente. O estudo feito apenas com o diâmetro de 100 mm que permite analisar frequências entre os 100 Hz e 1600 Hz, não aparenta comprometer muito este estudo.

No término de cada sessão de ensaios foi de novo medida a temperatura e a pressão atmosférica no interior do tubo de impedância.

Nos ensaios em câmara reverberante, a avaliação do coeficiente de absorção sonora baseia-se na medição dos tempos de reverberação, no interior da câmara, sem e com a presença da amostra a ser ensaiada. Seguiram-se os procedimentos da norma NP ISO 354:2007, usando o método de ruído interrompido. Foi gerado um campo sonoro, com uma fonte sonora omnidirecional, emitindo ruído de banda larga, captado pelos microfones. Após a interrupção do ruído, desligando-se a fonte, é medido o decaimento do nível de pressão sonora que permite a determinação do tempo de reverberação.

Formalmente, a avaliação do tempo de reverberação é baseada em curvas de decaimento. A gama de avaliação da curva de decaimento foi de 20 dB. O tempo de reverberação é expresso a partir da média aritmética do número total das 36 repetições. Registou-se a área do provete de ensaio pois, para obtenção do coeficiente de absorção sonora, existe, além deste valor, a necessidade de saber a área de absorção sonora equivalente, A_1 , da câmara reverberante vazia, de acordo com a expressão, cujas parcelas estão identificadas na simbologia:

$$A_1 = \frac{55,3V}{c_1 T_1} - 4Vm_1 \quad (2)$$

Também é necessário a determinação da área de absorção sonora equivalente, A_2 , da câmara reverberante, contendo o provete (ver simbologia):

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

A diferença entre os valores provenientes das expressões descritas é a absorção sonora equivalente do provete de ensaio, A_T . A obtenção do coeficiente de absorção sonora fornecido por este ensaio é então calculado pela razão entre esta grandeza e a área do provete em ensaio:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (4)$$

Este valor é referido nesta dissertação como α , simplesmente coeficiente de absorção sonora, estando subentendida a designação de acordo com o ensaio de que advém.

Antes do início de cada ensaio, foi verificada a precisão dos microfones, através do calibrador acústico do sistema da câmara reverberante, que não detetou, em nenhuma situação, qualquer desvio em relação ao valor de calibração. Antes de cada medição verificou-se também a inexistência de portas abertas ou outras aberturas nas câmaras.

Inicialmente é feita esta medição com a câmara vazia para obtenção do valor de referência de modo a conseguir-se avaliar o efeito dos materiais em estudo. A câmara tem instalados, no teto, elementos difusores que permitem garantir um campo difuso na câmara (ver figura 3.15).

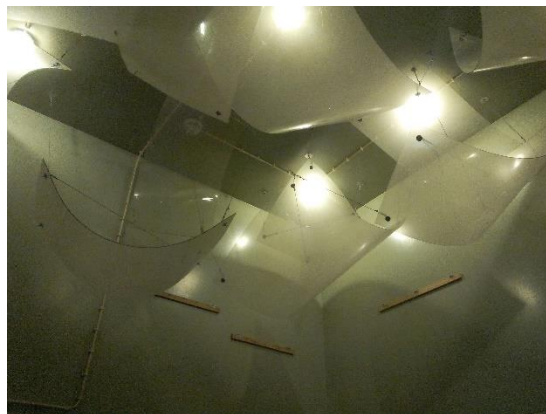


Figura 3.15 – Elementos difusos curvos instalados no interior da câmara reverberante

Os provetes integrantes do estudo experimental são do tipo absorvente plano e possuem uma área total de 12 m^2 , numa configuração de $3 \text{ m} \times 4 \text{ m}$. Possuem, portanto, uma forma retangular com uma relação entre a largura e o comprimento de 0.75 . Foram instalados, de acordo com a norma, de forma a que a distância de qualquer um dos seus pontos às paredes da câmara fosse superior a 0.75 m . A sua disposição era não paralela às paredes da câmara, cumprindo-se assim os requisitos normativos.

Como já foi referido na descrição das amostras no subcapítulo 3.2.2, existiu a necessidade de agilizar e facilitar o processo de montagem e instalação dos provetes. Com efeito, o recurso ao sistema de tabuleiros foi feito nesse sentido, para que o transporte do material pudesse ser feito

de forma limpa e rápida. O recurso ao apoio em paletes, aconteceu para facilitar a deslocação do considerável volume de material que se pretendeu estudar. A câmara reverberante do ITeCons encontra-se num piso inferior ao laboratório onde se insere. Os tabuleiros foram preparados no nível superior do laboratório, por uma questão meramente logística, onde foram assentes em paletes de madeira de 1 m x 1 m, que se mantiveram durante os ensaios. O transporte de cada conjunto de tabuleiro e palete foi feito com recurso a porta paletes no piso superior, tendo posteriormente sido feito o encaminhamento para o piso inferior, através de um sistema elevatório de carga, com o recurso a cintas que os mantinham em suspensão.

A câmara encontrava-se em condições semelhantes de temperatura e humidade relativa aquando das medições com a câmara vazia e com a câmara contendo o provete, para cada uma das fases dos ensaios. Os ensaios tiveram lugar nos meses de maio e julho.

Durante cada ensaio, as medições foram feitas com diferentes posições do microfone, em 3 posições de paragem distintas, separadas de 120°, e com 4 posições da fonte sonora. A cada mudança de direção do microfone, foi feita a confirmação visual da rotação do mesmo, através da transmissão de imagem em tempo real feita pelo *software* usado. Registaram-se 3 decaimentos em cada uma das posições referidas, perfazendo-se um total de 36 medições por amostra.

No final de cada ensaio, fez-se nova verificação da precisão dos microfones, fazendo-se uso do calibrador acústico.

O procedimento acima descrito, foi em traços gerais, o mesmo para os 6 ensaios realizados na câmara reverberante.

Com o ensaio 1 e 2 avaliaram-se respetivamente os substratos S1 (ver figura 3.16 (à esquerda)) e S2 (ver figura 3.16 (à direita)). Os tabuleiros foram cheios com o substrato ao natural, diretamente retirado de cada um dos sacos presentes no laboratório, até uma altura de 7.5 cm (para deixar espaço para a colocação da vegetação). Todos os passos respeitantes a este tipo de ensaio, acima descritos, foram respeitados na execução destas medições.



Figura 3.16 – Ensaio em câmara reverberante dos substratos S1 (à esquerda) e S2 (à direita)

Continuou-se com os ensaios 3 e 4 que decorreram em maio, após aplicação dos tapetes vegetais a provetes iguais ao do ensaio 1. A altura de substrato mantém-se constante, sendo, no entanto, nestes ensaios apenas integrante o substrato mais orgânico, o S1. O objeto em estudo, o substrato com vegetação, nestas condições, apresenta o aspeto apresentado na figura 3.17. Foram cumpridos os procedimentos normativos e reproduzidos os passos dos ensaios anteriores.



Figura 3.17 – Ensaio em câmara reverberante do substrato S1 com os tapetes vegetais, em maio, V1 (à esquerda) e V2 (à direita)

Sendo o presente estudo focado nos elementos naturais que constituem as coberturas verdes, teve interesse o estudo de uma fase de crescimento avançada dos tapetes disponíveis. Com efeito, permitiu-se o crescimento natural, sem manutenção relevante, da camada verde de cada uma das espécies (ver figura 3.18). No mês de julho, procedeu-se aos ensaios destes conjuntos, de forma semelhante aos conduzidos sobre os mesmos provetes, noutra fase do crescimento da vegetação, respeitando as normas.



Figura 3.18 – Ensaio em câmara reverberante do substrato S1 com os tapetes vegetais, em julho, V1 (à esquerda) e V2 (à direita)

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo, é feita a apresentação e discussão dos resultados obtidos com os estudos experimentais realizados. A exposição destes realiza-se com recurso a gráficos que traduzem o coeficiente de absorção sonora em função da frequência em Hz. O *software* utilizado no ensaio do tubo de impedância fornece os dados com precisão de 2 em 2 Hz. Contudo, o tratamento de dados vai ser feito em bandas de 1/3 de oitava, pretendendo-se assim uma abordagem mais comum. Os valores correspondentes a cada curva resultam da média dos resultados obtidos nas 4 medições de cada ensaio. Também os resultados provenientes do ensaio em câmara reverberante vão ser avaliados em bandas de terços de oitava. Os valores expostos advêm da média espacial dos resultados de cada medição em cada ensaio, de um total de 36.

Na figura 4.1 (esquerda) apresentam-se as curvas de absorção sonora para o substrato S1, nas condições em que se encontrava no laboratório (ensaio 1, 2, 3 e 4), com uma humidade original de 7.3%. Relembre-se que o seu nome comercial é “Siro Mistura 086.00” e que este é o substrato mais orgânico. É possível observar a diferente evolução das curvas de absorção sonora consoante a profundidade de substrato avaliada, sendo a sinuosidade de todas as curvas semelhante. Atendendo às 3 curvas onde o parâmetro a variar foi a espessura do substrato nota-se que, no início do gráfico, para as frequências mais baixas, o coeficiente de absorção é maior para as maiores espessuras (até à banda de 250 Hz). Normalmente, num material poroso, o aumento da espessura conduz a um aumento da absorção sonora nas frequências mais baixas. No entanto, a partir de determinado valor, com o aumento da frequência, o coeficiente de absorção sonora (α) é maior para menores espessuras do substrato. Entre os 400 e os 1000 Hz, os maiores valores correspondem à profundidade de 8 cm, seguida da de 10 cm e da de 12 cm. A partir da banda dos 1000 Hz, a profundidade que apresenta maiores valores de α é a de valor intermédio 10 cm. Analisando as curvas em geral, o valor em estudo aumenta com o aumento das frequências mais baixas, até um limite de aproximadamente 400 Hz, onde se verifica o maior valor global, que corresponde a 0.88 para a espessura de 8 cm que se repete aos 500 Hz. Seguidamente, observa-se uma tendência da diminuição do coeficiente de absorção sonora até cerca dos 1000 Hz, estando compreendido entre estas frequências o menor valor presente nas curvas, correspondendo à maior espessura, sendo este de 0.59 aos 500 Hz. A partir dos 1000 Hz os valores são mais elevados, assumindo na frequência mais elevada do estudo os valores de 0.81 para 8 e 10 cm e 0.76 para 12 cm. O ensaio em que foi avaliada a compactação do

substrato é o que apresenta menores valores gerais do parâmetro estudado, em toda a gama de frequências.

Na figura 4.1 (direita) encontram-se as curvas de absorção sonora para os ensaios com o “Siro Mistura 076.00” (ensaios 5, 6, 7 e 8) designado anteriormente por S2. Este tinha um teor de humidade de 4.2%. Este substrato apresenta um comportamento com uma tendência semelhante ao substrato S1. Para as frequências mais baixas (até aos 250 Hz), a absorção sonora é superior para as camadas com maior espessura. Para as frequências superiores, o ensaio que apresentou, na generalidade, maior absorção sonora, foi o da espessura de 8 cm, com um valor de α de 0.90 aos 400 e 500 Hz, verificando-se a partir destas frequências, até aos 1000 Hz, que os maiores valores do coeficiente de absorção sonora correspondem à curva da menor espessura, os valores intermédios apresentam-se em geral na espessura intermédia e os menores valores assinalam-se na curva da maior espessura. O menor valor é 0.56 aos 630 Hz. A partir dos 1000 Hz existem várias posições relativas das curvas, sendo a mais baixa sempre a do ensaio 7 (substrato de 12 cm). Na frequência máxima analisada, os valores atingidos são de 0.76 para os 8 cm, 0.71 para os 10 cm e 0.68 para os 12 cm. A menor absorção sonora acontece, em todas as frequências, para o ensaio do substrato compactado, com valores inferiores a qualquer um obtido nos outros ensaios em que apenas variava a espessura.

Estas variações das curvas nas bandas de frequência de 250 e 1000 Hz, de forma geral, para ambos os substratos, podem não estar apenas ligadas ao comportamento do substrato por si só, mas ao substrato confinado na instalação em que se encontra. O comportamento esperado é o correspondente ao observado para as frequências mais baixas, sendo este o aumento da absorção com a espessura. A interação das ondas planas com o material granular acontece sob a forma de penetração destas nos poros do material, acontecendo o fenómeno de absorção sonora, tanto maior quanto maior a espessura. Nas frequências mais baixas, a camada funciona como um todo, existindo fenómenos de vibração do provete uniformemente. Da interação com as ondas de frequências mais altas, nas espessuras maiores, pode acontecer que, devido ao aumento da espessura, o peso faça diminuir a porosidade por efeito da gravidade e vibração, não acontecendo a penetração das ondas sonoras a partir de determinado valor da espessura, sendo a maior absorção correspondente às menores espessuras.

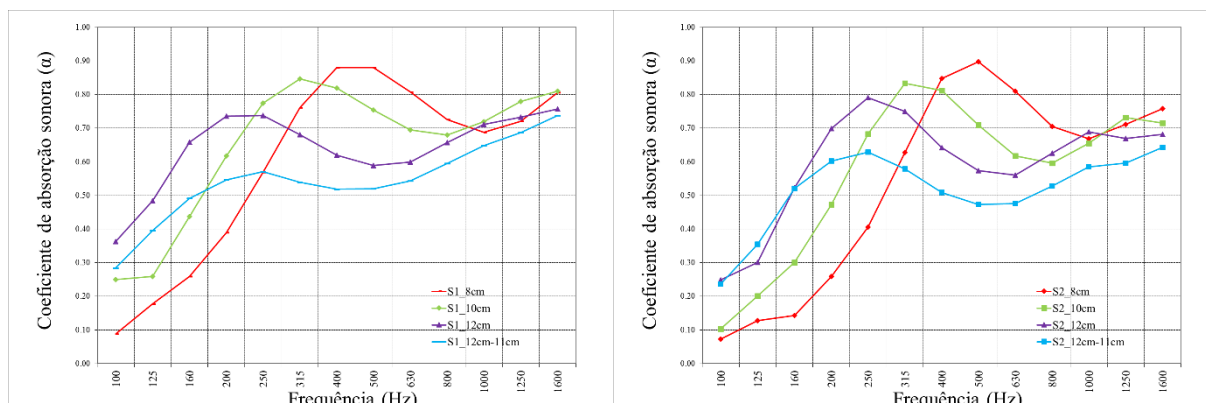


Figura 4.1 – Absorção sonora para incidência de ondas planas para condições originais de humidade: substrato S1 (à esquerda); substrato S2 (à direita)

As constituições dos substratos são diferentes e as condições de humidade, apesar de ambas baixas, são praticamente o dobro uma da outra, o que torna difícil fazer a comparação entre os materiais estudados. No entanto, aparentemente, os ensaios aos substratos para condições de humidade não controladas, indicam que o substrato com melhor desempenho relativamente à absorção sonora é o S1, não sendo esta diferença muito pronunciada. Este é o substrato mais orgânico e com maior teor de humidade. A título de exemplo, para melhor perceção desta comparação, apresentam-se na figura 4.2 as curvas dos ensaios 1 e 5, a vermelho. Para ambos os substratos, a menor capacidade de absorção sonora verifica-se nas situações em que estes foram compactados, sendo também aqui o melhor desempenho global o do substrato S1 (ver figura 4.2 curvas a azul). O resultado era expectável, pois a compactação provoca a diminuição dos espaços vazios do substrato, o que dificulta a penetração das ondas sonoras comparativamente com uma amostra solta.

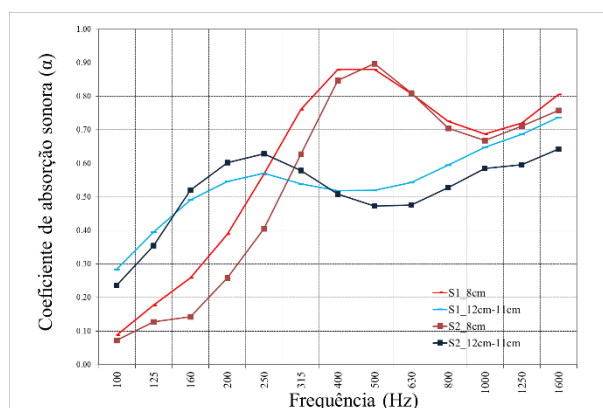


Figura 4.2 – Absorção sonora para incidência de ondas planas para condições originais de humidade: curvas dos ensaios dos substratos com 8 cm (a vermelho) e 12cm-11cm (a azul)

Os resultados dos ensaios realizados, após a secagem das amostras previamente ensaiadas ao natural, encontram-se apresentados na figura 4.3. A secagem faz com que os substratos se encontrem em iguais condições no que toca ao teor de humidade, permitindo um estudo mais focado no desempenho do substrato relativamente à sua constituição.

Na figura 4.3 (esquerda) são visíveis os resultados das medições feitas com o substrato S1, referentes aos ensaios 9, 10, 11 e 12. As curvas verde, roxa e azul apresentam um desenvolvimento semelhante, sendo a curva a vermelho a mais diferente. Esta corresponde ao ensaio para a espessura de 8 cm que apresenta o valor mais elevado da absorção sonora de todos os ensaios, 0.87, numa gama específica de frequências (entre os 315 e os 800 Hz). Em geral, até aos 250 Hz absorção sonora aumenta com a espessura. Após os 250 Hz, a absorção sonora diminuiu com o aumento da espessura do substrato até à frequência de 800 Hz. A partir desta banda de frequências, até ao maior valor analisado, 1600 Hz, os maiores valores são para a espessura intermédia, seguida da maior e finalmente da mais pequena. Os valores verificados na frequência mais alta são para 8, 10 e 12 cm, respetivamente, 0.77, 0.76 e 0.74. Verifica-se que o ensaio do substrato compactado é o que apresenta valores de α mais baixos para todas as frequências apresentadas.

Manifesta-se, nos resultados apresentados na figura 4.3 (direita), um semelhante desenvolvimento das curvas de absorção sonora. O maior valor fornecido pela análise ao substrato S2 seco é de 0.84 aos 500 Hz e observa-se na curva dos 8 cm. Para o intervalo de frequências até as 250 Hz a absorção sonora aumenta com o aumento da espessura. A partir daí, até aos 1000 Hz, verifica-se uma inversão desta situação, diminuindo o valor em estudo com o aumento da espessura. A partir dos 1000 Hz não é constante a relação entre a variação da profundidade e a variação dos valores do α , sendo a melhor curva a correspondente à espessura de 10 cm, seguida da curva de 8 cm, sendo a de 12 cm, a pior. A pior situação é novamente para a espessura 11 cm após compactação.

Novamente neste tipo de ensaio, as inversões das tendências das curvas entre os 100 e os 250 Hz (S1 e S2), entre os 250 e os 800 Hz para o substrato S1 e 250 e 1000 Hz para o substrato S2m e da banda de 1000 até à de 16000 Hz para ambos, podem ser devidas às considerações feitas relativamente ao provete, acima apontadas, a par com as características do solo que diferem destes ensaios em termos do teor de humidade.

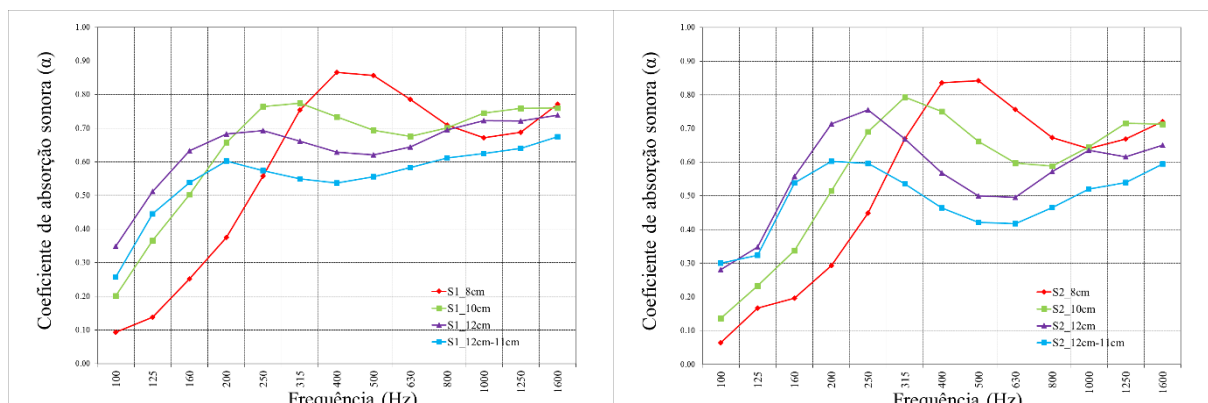


Figura 4.3 – Absorção sonora para incidência de ondas planas após secagem em estufa: substrato S1 (à esquerda); substrato S2 (à direita)

Comparativamente, os dois substratos apresentam um desenvolvimento da curva de absorção sonora semelhante, porém diferem na gama dos coeficientes de absorção sonora que atingem. O substrato S1, apresenta, no geral, maiores valores de α perante a incidência de ondas planas, que o substrato S2, o menos orgânico (ver figura 4.4). Repetem-se os resultados para os ensaios com os substratos compactados. A composição de ambos é distinta, mas da mesma natureza, podendo pois adiantar-se a ideia que a percentagem de matéria orgânica é um fator intrínseco do substrato com grande influência no comportamento do componente em estudo.

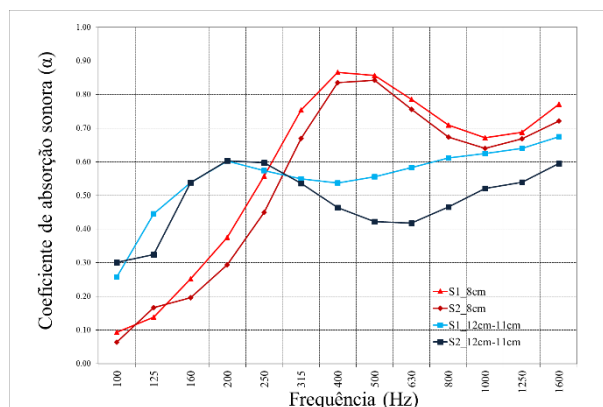


Figura 4.4 – Absorção sonora para incidência de ondas planas para condições secas: curvas dos ensaios dos substratos com 8 cm (a vermelho) e 12cm-11cm (a azul)

Para discussão da influência do teor de humidade no substrato, fez-se uma comparação entre a absorção do substrato em estado seco e nas condições originais. Na figura 4.5 (esquerda) apresentam-se os resultados para o substrato S1 e na figura 4.5 (direita) para o substrato S2. As

curvas são correspondentes aos ensaios para as espessuras de 8 cm, 10 cm e 12 cm. É visível que, para um mesmo substrato, a capacidade de absorção diminui com a diminuição do teor em água. Para a o substrato S1, com espessura de 8 cm, a diferença dos valores da absorção sonora é mínima, sendo as curvas coincidentes em vários pontos, tanto nas frequências mais baixas, como nas mais altas. Na espessura intermédia, a absorção do substrato, em condições originais, é claramente maior. Para a espessura de 12 cm, o substrato original apenas se revela mais absorvente nas frequências mais baixas, pois, a partir dos 400 Hz verifica-se uma inversão das curvas, sendo a correspondente ao solo seco a que assume valores de α superiores. Por sua vez, da análise dos resultados do substrato S2, constata-se que a diminuição do coeficiente em estudo, após secagem da amostra, é comum a todas as espessuras de substrato consideradas no procedimento experimental. Quando os substratos são secos ficam com um aspeto mais desagregado, permitindo um rearranjo das partículas, tornando-o mais denso e menos poroso.

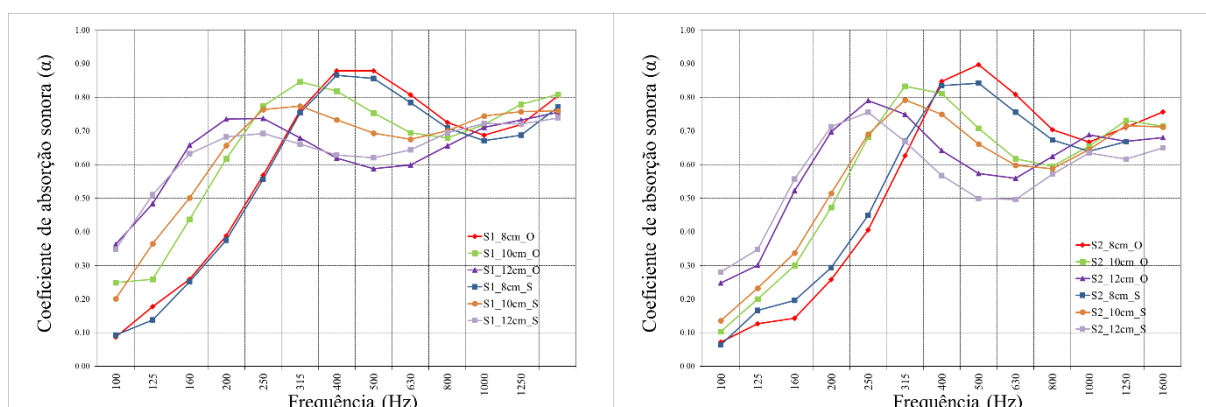


Figura 4.5 – Coeficiente de absorção sonora para incidência de ondas planas antes e após secagem em estufa para as espessuras de 8, 10 e 12 cm: substrato S1 (à esquerda); substrato S2 (à direita)

Para confirmação dos resultados obtidos com a variação do teor de humidade, seria bastante interessante o estudo de amostras de várias espessuras em câmara reverberante com o substrato húmido e seco. No entanto, em termos práticos, existe alguma dificuldade em secar quantidades tão grandes de substrato e a repetição de ensaios em câmara reverberante exige uma logística muito superior à necessária para realizar os ensaios em tubo de impedância. Relativamente aos ensaios iniciais, também no ensaio em que se compactou o substrato, foi evidente a redução da capacidade de absorção (ver figura 4.6). Com o processo de secagem, as amostras ficaram com outra densidade e outro aspeto. O seu rearranjo, quando sujeitas a ações de compressão, é então diferente, no sentido em que o imbricamento é maior. Assim, o substrato, depois de seco, torna a amostra menos porosa e consequentemente menos arejada.

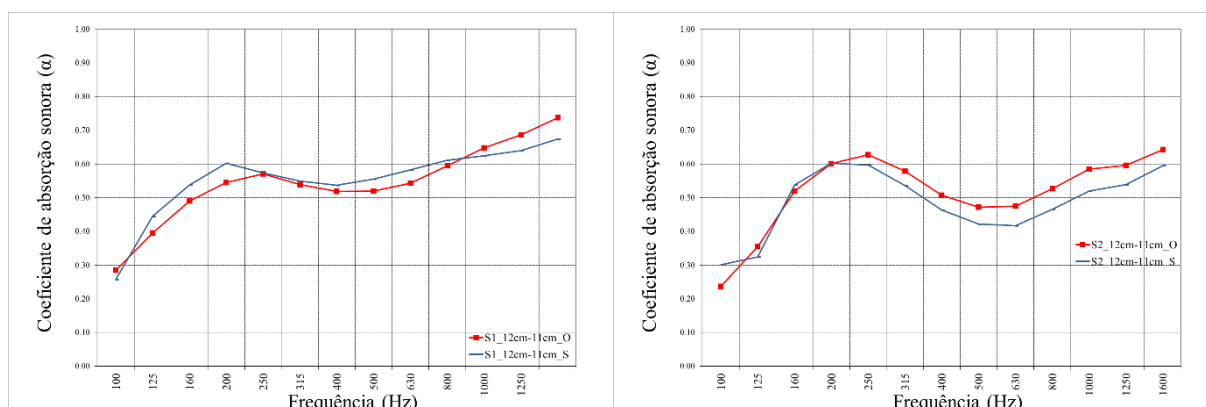


Figura 4.6 – Coeficiente de absorção sonora para incidência de ondas planas antes e após secagem em estufa nos ensaios 12 cm – 11 cm: substrato S1 (esquerda); (b) substrato S2 (direita)

O estudo isolado deste componente que constitui as coberturas verdes, em tubo de impedância, foi complementado com a adição de um tapete vegetal de relva para que este componente fosse também alvo de estudo. Estes são os principais constituintes das coberturas verdes no que toca à diferenciação das mesmas. Como foi explicado no capítulo 2, as camadas que se encontram entre a estrutura e o substrato são geralmente escolhidas dentro dos mesmos materiais e possuem as mesmas características. Sendo a camada de substrato e a vegetação os aspetos principais que atribuem a tipologia à cobertura verde, de entre as extensivas e as intensivas, existiu a necessidade de estudar a sua influência no coeficiente de absorção sonora de um conjunto representativo destas duas camadas.

A escolha da espessura de substrato foi motivada pela articulação com a execução do provete do ensaio da câmara reverberante, criando-se assim condições comuns que permitam relacionar alguns dos resultados obtidos com estes procedimentos experimentais tão distintos. Na figura 4.7 apresentam-se os resultados fornecidos pelo *software* provenientes dos ensaios 17, 18 e 19. A curva castanha resulta dos valores do ensaio com apenas o substrato e a amarela traduz os resultados dos ensaios em que se encontrava instalado o tapete verde com uma altura de 50 mm. É notória a influência positiva do elemento de vegetação no aumento do coeficiente de absorção sonora, para ondas planas. Nas frequências entre os 100 Hz e os 400 Hz, o desenvolvimento da curva é semelhante ao correspondente da do substrato. A partir deste valor, a curva destaca-se da do substrato aumentando significativamente. Para os 800 Hz, a curva do ensaio do substrato (curva castanha) toma o valor de α de 0.71, assumindo na curva amarela o valor de 0.86. Para os 1000 Hz os valores foram 0.69 e 0.93 e ainda para os 1250 Hz, 0.72 e 0.97. Estas são diferenças consideráveis que não deixam dúvidas que, para esta gama de frequências, a presença do tapete vegetal é extremamente significativa, contribuindo para aumentar a absorção

sonora. As curvas correspondentes às alturas de relva de 50 mm e 125 mm não apresentam grandes diferenças, estando inclusive sobrepostas para as frequências mais baixas e novamente para as mais elevadas. Pode-se, no entanto, observar que entre os 250 Hz e os 1250 Hz, o aumento da altura da estrutura da vegetação, no caso de uma semelhante a esta espécie, provoca o aumento da absorção sonora.

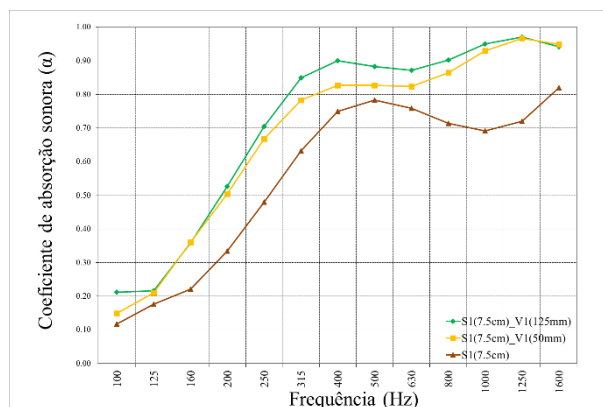


Figura 4.7 – Absorção sonora para incidência de ondas planas dos ensaios com substrato S1 e tapete verde V1

Os trabalhos experimentais em câmara reverberante foram feitos com os dois substratos e posteriormente para os dois tipos de vegetação disponíveis sobre o substrato S1. Na figura 4.8 apresentam-se os resultados para os ensaios referentes apenas aos substratos (ensaio 1 e 2 do programa experimental dos ensaios em câmara reverberante). O estudo em câmara reverberante abrange uma gama de frequências maior que a do tubo de impedância para o diâmetro de 100 mm, sendo dos 100 até aos 5000 Hz. Da análise do gráfico, infere-se que, em geral, o substrato S1 apresenta melhores coeficientes de absorção sonora. Na gama de frequências mais baixa, até aos 500 Hz, o S1 apresenta melhores valores para o α . Entre os 500 Hz e os 1250 dá-se o contrário, sendo os resultados do desempenho obtido com o substrato S2 melhores. Dos 1250 até ao valor máximo da banda de 5000 Hz existe nova inversão, sendo o S1, o mais orgânico mais absorvente. O maior valor do coeficiente de absorção sonora verifica-se para o valor máximo de frequências e é de 1.16. Devido à formulação da determinação do α deste ensaio, explicada no subcapítulo 3.4, o valor do coeficiente de absorção resultante do cumprimento da metodologia escolhida é superior a 1. No entanto, em termos práticos, assume-se que o valor máximo que o α pode assumir é 1, correspondente ao valor limite teórico apresentado em (Tadeu et al, 2010), correspondente à situação de absorção total. Para efeitos de comparação de resultados detalhada, os valores analisados serão os lidos nos gráficos, numa escala de 0 a 1.20.

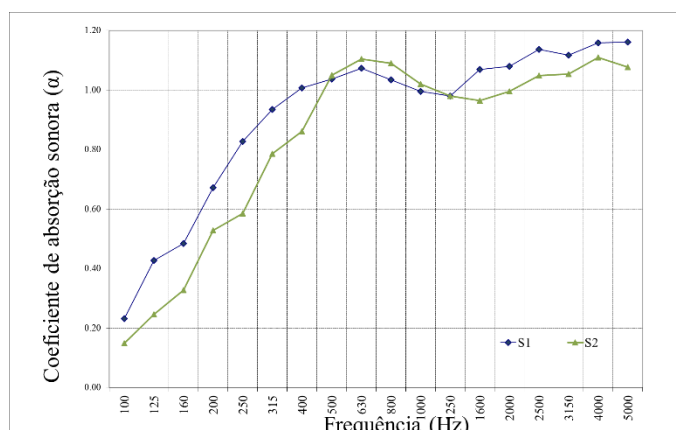


Figura 4.8 – Absorção sonora para incidência de ondas de campo difuso dos ensaios com os substrato S1 e S2

Na figura 4.9 apresentam-se os resultados dos ensaios em que apenas o substrato S1 foi analisado com os tapetes vegetais em maio. Foi suficiente o estudo com apenas um dos substratos uma vez que com os ensaios 3, 4 se pretende estabelecer a comparação entre os tipos de tapetes disponíveis e também avaliar o efeito da presença da vegetação sobre o substrato. Devido à extensa logística que este tipo de provete de elevadas dimensões implica, considerou-se suficiente esta consideração para efeitos do estudo da presente dissertação.

Assim sendo, observa-se que o tapete vegetal constituído por *sedum*, gramíneas e herbáceas (V2) é o que, claramente, apresenta valores do coeficiente de absorção sonora mais elevados em toda a gama de frequências, exceto para uma gama reduzida, entre os 3150 e os 5000 Hz. Para enfatizar a diferença, apontam-se alguns valores. Banda de 200 Hz, V1 com α de 0.60 e V2 com α 0.88. Banda de 500 Hz, V1 com α de 0.47 e V2 com α de 0.9. Banda de 2500 Hz, V1 com 0.76 e V2 com 0.92. Atendendo ao aspeto dos tapetes vegetais, visível na figura 3.17, o tapete de relva (V1) tem uma configuração mais rasteira e compacta. O tapete de *sedum*, V2 tem uma estrutura menos homogénea e mais alta. Esta poderá ser umas das explicações relativas aos resultados obtidos, no sentido em que a estrutura do V2 permite uma maior penetração das ondas do campo difuso, alterando o seu caminho no sentido do substrato, que como foi inferido com o ensaio 1 é um elemento bastante absorvente. A inversão das curvas pode ser explicada por acontecer em bandas de frequência já bastante elevadas, em que a estrutura da vegetação, que para frequências mais baixas tinha determinado comportamento, se modifica devido às características das ondas incidentes.

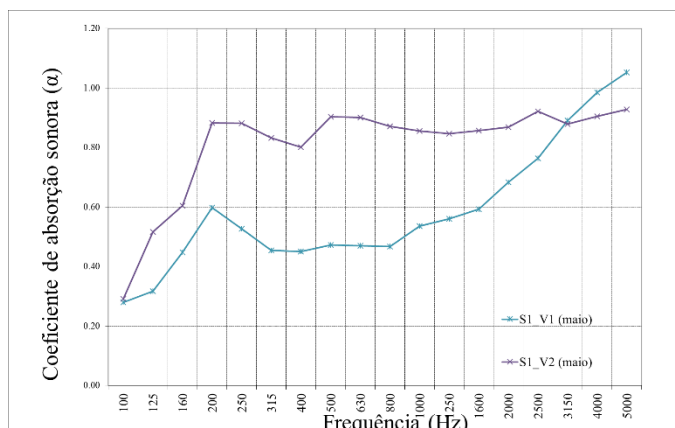


Figura 4.9 – Absorção sonora para incidência de ondas de campo difuso dos ensaios com os substrato S1 e tapetes vegetais V1 e V2 em maio

Relativamente ao efeito da adição do elemento vegetal, o gráfico apresentado na figura 4.10 mostra que, comparativamente com o ensaio em que apenas o substrato fazia parte da composição do provete, tanto a relva, como o *sedum*, em geral, não contribuem para o aumento da absorção sonora, para as frequências de uma gama acima dos 315 Hz. Nas frequências abaixo deste valor, a absorção sonora é potenciada pela presença da vegetação, no caso do tapete V2. O conjunto tapete V1 e substrato S1 confere menores valores que o substrato isolado em toda a gama de frequências considerada. Refira-se que a vegetação foi fornecida em tapete (composto pela vegetação “presa” a uma pequena espessura de substrato compacto) e o substrato solto que existia nos tabuleiros ficou coberto por estes tapetes.

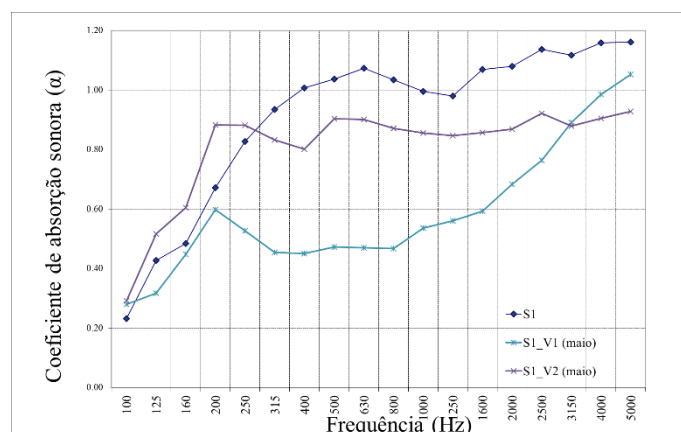


Figura 4.10 – Absorção sonora para incidência de ondas de campo difuso dos ensaios com os substrato S1 isolado e S1 e tapetes vegetais V1 e V2

Para avaliar a influência do crescimento da vegetação relativamente ao efeito desta na absorção sonora de ondas em campo difuso, foram realizados os ensaios 5 e 6 que tiveram lugar em julho. Os tapetes vegetais tinham o aspeto apresentado na figura 3.18. Os resultados são os apresentados na figura 4.11, onde é possível observar que o comportamento conferido pelo tapete vegetal V1 abrange coeficientes de absorção sonora menores que o tapete V2 até à gama de frequências 3150 Hz. Com efeito, o ensaio 6 (tapete V2) tem um α maior que o ensaio 5 (tapete V1) nas bandas de frequência de 200 Hz, respetivamente, α de 0.71 e de 0.48, banda de 500 Hz, 0.77 e 0.51, banda de 2500 Hz, 0.84 e 0.73. O maior valor o obtido é, no entanto, para o tapete vegetal V1, sendo 1.06, pois a tendência inicial das curvas inverte-se dos 3150 até aos 5000 Hz. Este facto pode ser explicado, mantendo-se a maior heterogeneidade da estrutura do tapete de *sedum*, pelos motivos acima descritos em relação aos tapetes ensaiados em maio.

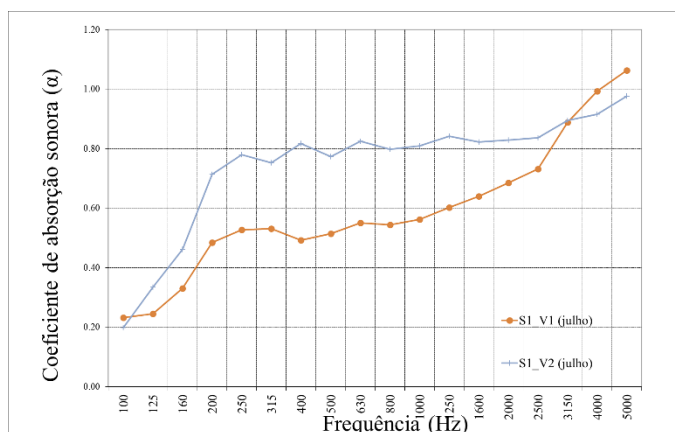


Figura 4.11 – Absorção sonora para incidência de ondas de campo difuso dos ensaios com os substrato S1 e tapetes vegetais V1 e V2 em julho

O efeito do crescimento da vegetação pode ser analisado com a sobreposição das curvas referentes a cada um dos tapetes vegetais avaliados nos dois meses distintos em que tiveram lugar os ensaios (ver figura 4.12). Existiu alteração relativamente à absorção sonora. No caso do tapete vegetal V1, com a altura mais pequena de relva (em maio) verificaram-se maiores valores de α nas bandas de frequências mais baixas, até aos 200 Hz. Daí em diante, deu-se uma diminuição da capacidade de absorção sonora em relação ao ensaio de julho (quando a relva estava muito maior), até aos 2000 Hz, valor a partir do qual as curvas praticamente coincidem. Os outros dois provetes em estudo, relativamente ao aumento da altura dos tapetes vegetais V2, tiveram como resultado, uma constante maior absorção sonora para a menor altura da vegetação (curva a roxo). Esse aumento relativo à vegetação traduz-se num adensamento da mesma, o que irá dificultar a penetração das ondas sonoras até ao nível do substrato. O que justifica os

resultados dos dois tipos de vegetação em estudo, atendendo às suas características estruturais e à capacidade que cada apresenta de cobertura do substrato. Como se pode observar também na figura 4.12, o ensaio que maiores valores de α apresenta para a grande generalidade de bandas de frequência, é aquele em que o substrato foi ensaiado individualmente. Tendo em conta estas duas considerações, verifica-se que a melhor situação, das 3 que se simularam nos ensaios em câmara reverberante, é a do ensaio 1 (substrato S1 isolado), seguida dos ensaios 4 e 6 (S1 e V2), por esta ordem e por fim os ensaios 3 e 5, muito semelhantes.

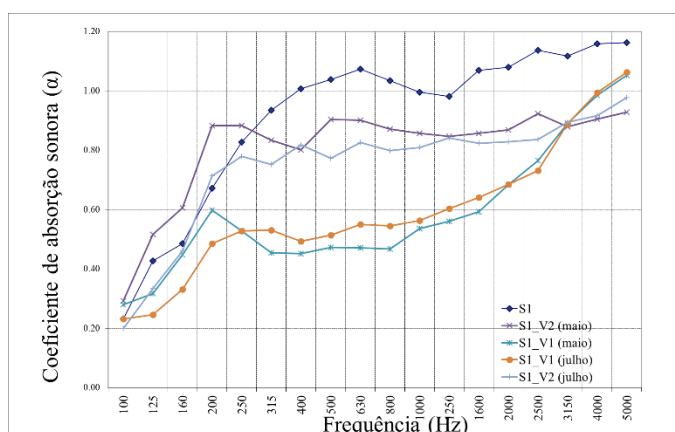


Figura 4.12 – Absorção sonora para incidência de ondas de campo difuso em câmara reverberante

Pensa-se ser interessante comparar os resultados obtidos em a câmara reverberante (CR) e em o tubo de impedância (TI) (ver figura 4.13), para os ensaios com o substrato S1 e tapete de vegetação V1, com a consciência que, apesar de terem sido ensaiados os mesmos materiais, estes se encontravam em condições distintas, a somar à diferença da incidência das ondas, em campo difuso na câmara reverberante e planas no tubo de impedância. Também a gama de frequências num dos ensaios era bastante superior à do outro. A semelhança existente era a espessura do substrato, sendo este de 7.5 cm e o tipo, S1, o mais orgânico. Apesar das diferenças, há alguns pontos dignos de nota. As curvas referentes aos substratos apresentam o mesmo desenvolvimento, quer nos ensaios em CR, quer nos ensaios em TI, sendo os valores de α obtidos com a câmara muito superiores aos do tubo. O efeito da vegetação é consideravelmente mais favorável no ensaio do TI, com qualquer uma das alturas ensaiadas, do que no ensaio em CR, que apresenta valores bastante baixos do coeficiente de absorção sonora até à banda de 1600 Hz.

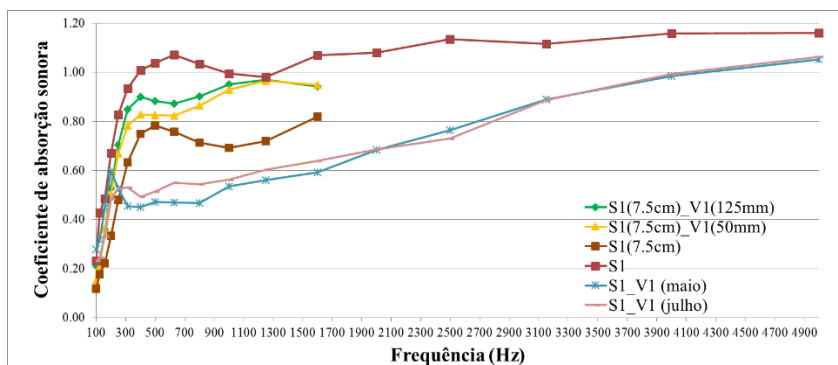


Figura 4.13 – Sobreposição dos resultados da absorção sonora em câmara reverberante e tubo de impedância para o substrato S1 e o tapete vegetal S1

O conjunto dos resultados obtidos com o trabalho experimental encontram-se apresentados no quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Quadro resumo dos resultados obtidos

		Frequências																	
		100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Coeficiente de absorção sonora	Ensaio TI																		
	1	0.09	0.18	0.26	0.39	0.57	0.76	0.88	0.88	0.81	0.73	0.69	0.72	0.81					
	2	0.25	0.26	0.44	0.62	0.77	0.85	0.82	0.75	0.70	0.68	0.72	0.78	0.81					
	3	0.36	0.48	0.66	0.74	0.74	0.68	0.62	0.59	0.60	0.66	0.71	0.73	0.76					
	4	0.28	0.40	0.49	0.55	0.57	0.54	0.52	0.52	0.54	0.60	0.65	0.69	0.74					
	5	0.07	0.13	0.14	0.26	0.41	0.63	0.85	0.90	0.81	0.70	0.67	0.71	0.76					
	6	0.10	0.20	0.30	0.47	0.68	0.83	0.81	0.71	0.62	0.60	0.66	0.73	0.71					
	7	0.25	0.30	0.52	0.70	0.79	0.75	0.64	0.57	0.56	0.63	0.69	0.67	0.68					
	8	0.24	0.35	0.52	0.60	0.63	0.58	0.51	0.47	0.48	0.53	0.58	0.60	0.64					
	9	0.09	0.14	0.25	0.38	0.56	0.75	0.87	0.86	0.79	0.71	0.67	0.69	0.77					
	10	0.20	0.37	0.50	0.66	0.76	0.77	0.73	0.69	0.68	0.70	0.74	0.76	0.76					
	11	0.35	0.51	0.63	0.68	0.69	0.66	0.63	0.62	0.64	0.70	0.72	0.72	0.74					
	12	0.26	0.45	0.54	0.60	0.57	0.55	0.54	0.56	0.58	0.61	0.62	0.64	0.67					
	13	0.06	0.17	0.20	0.29	0.45	0.67	0.84	0.84	0.76	0.67	0.64	0.67	0.72					
	14	0.14	0.23	0.34	0.52	0.69	0.79	0.75	0.66	0.60	0.59	0.65	0.72	0.71					
	15	0.28	0.35	0.56	0.71	0.76	0.67	0.57	0.50	0.50	0.57	0.64	0.62	0.65					
	16	0.30	0.32	0.54	0.60	0.60	0.54	0.46	0.42	0.42	0.47	0.52	0.54	0.59					
	17	0.30	0.32	0.54	0.60	0.60	0.54	0.46	0.42	0.42	0.47	0.52	0.54	0.59					
	18	0.21	0.22	0.36	0.53	0.70	0.85	0.90	0.88	0.87	0.90	0.95	0.97	0.94					
19	0.15	0.21	0.36	0.50	0.67	0.78	0.83	0.83	0.82	0.86	0.93	0.97	0.95						
		Ensaio CR																	
1	0.23	0.43	0.48	0.67	0.83	0.93	1.01	1.04	1.07	1.03	0.99	0.98	1.07	1.08	1.14	1.12	1.16	1.16	
2	0.15	0.25	0.33	0.53	0.59	0.79	0.86	1.05	1.10	1.09	1.02	0.98	0.96	0.99	1.05	1.05	1.11	1.08	
3	0.28	0.32	0.45	0.60	0.53	0.45	0.45	0.47	0.47	0.47	0.54	0.56	0.59	0.68	0.76	0.89	0.98	1.05	
4	0.29	0.52	0.60	0.88	0.88	0.83	0.80	0.90	0.90	0.87	0.86	0.85	0.86	0.87	0.92	0.88	0.90	0.93	
5	0.23	0.25	0.33	0.48	0.53	0.53	0.49	0.51	0.55	0.54	0.56	0.60	0.64	0.68	0.73	0.89	0.99	1.06	
6	0.20	0.33	0.46	0.71	0.78	0.75	0.82	0.77	0.83	0.80	0.81	0.84	0.82	0.83	0.84	0.89	0.92	0.98	

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Na presente dissertação, fez-se uma avaliação acústica de dois componentes que são determinantes para o comportamento das coberturas verdes, no que toca a fenómenos de interação com as ondas sonoras, o substrato e a vegetação.

Foram realizados ensaios à escala reduzida, com ondas planas de incidência normal ao provete em tubo de impedância, instalado na vertical. Para condições de humidade não controladas, conclui-se que, ambos os substratos revelam comportamentos de absorção sonora que variam conforme a gama de frequências. Com efeito, para as frequências mais baixas, a absorção sonora aumenta com o aumento da espessura, acontecendo o inverso na gama intermédia dos valores analisados, não existindo proporcionalidade, nas frequências mais altas, entre estas e as espessuras. Infere-se que, globalmente, o substrato mais orgânico, o S1, apresenta maior absorção sonora do que o menos orgânico, S2. Da análise dos resultados com os substratos secos em estufa, também se verifica nos dois, o aumento do coeficiente de absorção sonora para as frequências mais baixas em função do aumento da espessura, uma diminuição para a gama intermédia concordante com a diminuição da espessura e para as frequências mais altas, a camada intermédia é a conferente de maior absorção sonora. Nestas condições em que os substratos possuem a mesmas características relativamente à humidade, foi possível observar que o solo S1, em termos gerais, possui maior capacidade de absorção das ondas sonoras, podendo-se adiantar que a quantidade de matéria orgânica influencia a absorção sonora do substrato, aumentando com o aumento desta. Avaliando os ensaios, atentando a variação do teor de humidade, conclui-se que a absorção diminui com a diminuição do teor em água (para pequenos teores em água), sendo também possível adiantar que esta é uma característica determinante do desempenho acústico do substrato. A introdução do tapete vegetal demonstrou uma influência positiva deste elemento, para um ensaio deste tipo. No entanto, a variação da sua altura não gerou alterações dignas de nota. Em todos os casos em que se fez variar a espessura através da compactação do substrato, as conclusões são semelhantes, sendo nestes encontrados os piores valores globais de absorção sonora.

Fez-se também o estudo dos componentes através de uma avaliação em câmara reverberante, com a propagação de ondas em campo difuso. Verificou-se que, globalmente, o substrato mais orgânico apresenta maior absorção sonora do que o menos orgânico corroborando a influência positiva da presença de matéria orgânica no substrato. Fazendo uma consideração mais

detalhada, este facto não é constante ao longo de toda a gama de frequências analisada, sendo para a gama mais baixa, a maior absorção sonora registada para o S1, para a gama intermédia para o S2, repetindo-se a superioridade dos valores respeitantes ao S1 para as frequências mais altas. Das análises a partir das quais foi possível estabelecer uma comparação entre os tapetes vegetais em estudo, concluiu-se que o melhor desempenho é o do V2. As diferentes fases de crescimento estudadas permitem considerar que o aumento da estrutura da vegetação e o seu adensamento prejudicam a absorção sonora, quando na fase inicial o tapete já tinha vegetação alta (V2). No entanto, no caso da relva (V1) como ele cresceu bastante entre as duas fases, verificou-se que o crescimento foi vantajoso para uma gama específica de frequências. A presença do tapete vegetal traduziu-se em menores valores do coeficiente de absorção sonora. Este padrão verificou-se para os dois tipos de vegetação em estudo, bastante diferentes entre si, nas duas fases de crescimento. Como a vegetação foi colocada em tapete sobre o substrato inferior este não ficou a vista. Assim, com este tipo de ensaio, foi possível concluir com confiança que o elemento mais absorvente é, sem dúvida, o substrato.

Os processos experimentais escolhidos para esta análise apresentam pontos fortes e pontos fracos. Os inconvenientes dos ensaios com o tubo de impedância são o facto da incidência das ondas ser apenas na perpendicular à superfície do provete e este ter dimensões reduzidas, podendo ser pouco representativo da amostra, em especial para as frequências altas. As vantagens que este ensaio possui passam pela pequena quantidade de material necessária, reduzindo toda a logística e permitindo flexibilidade para ensaiar variação da espessura a avaliar, das condições de humidade e da compactação. Os procedimentos associados ao ensaio em câmara reverberante envolvem uma logística extensa, possibilitando, no entanto, a análise de amostras mais representativas e semelhantes às condições normais dos componentes das coberturas verdes.

A título conclusivo, adianta-se que o substrato pode ter um enorme contributo na absorção sonora, desde que a vegetação seja dispersa e exista substrato em contacto com o ambiente. Em casos em que a vegetação seja em tapete, a absorção sonora será bastante condicionada pelo tipo de vegetação aplicada. O comportamento de uma cobertura verde dependerá muito do tipo de substrato que a constitui, da sua espessura, do teor de humidade e nível de compactação. O tipo de vegetação poderá também condicionar grandemente a absorção sonora da mesma.

Seria ainda interessante aprofundar a caracterização dos componentes estudados, através de um programa experimental envolvendo ensaios acústicos no exterior, sendo este o local de instalação real das coberturas verdes. Seria curioso observar as variações geradas pela oscilação do teor de humidade fruto de variações climatéricas. Mais ainda seria o cumprimento deste

estudo em vários climas diferentes. Claro que a influência da variação do teor de humidade de forma sistemática poderá ser avaliada também através de ensaios laboratoriais. A absorção sonora das coberturas irá provocar uma diminuição dos níveis sonoros no ambiente. Assim, seria interessante verificar experimentalmente qual a diminuição do nível sonora provocada por estas coberturas. Outro trabalho que seria interessante realizar seria a execução de uma instalação de uma cobertura num compartimento de teste sujeito a medições do isolamento sonoro a sons aéreos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANCV@ Associação Nacional de Coberturas Verdes (2016) <http://ancv.webnode.pt/projetos/etar-de-alcantara-lisboa/>, Data de consulta: 19/12/2016.

AJ@. Architects Journal (2016) <https://www.architectsjournal.co.uk/opinion/architectural-writing-five-of-the-best-pieces-ever-written/8638979.article>, Data de consulta: 13/12/2016.

António, J. (2015) “Desenvolvimento e Construção Sustentável”. In: Apontamentos de Sustentabilidade do Ambiente Construído, Área Científica de Construções, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

António, J., Tadeu, A., Mateus, D. (2004). “Isolamento Acústico – Resultados Analíticos Versus Experimentais”. Acústica 2004, Guimarães, Portugal.

Berardi, U., GhaffarianHoseini A., GhaffarianHoseini, A. (2014). “State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs”. Applied Energy, Vol. 115, pp. 411-428.

BLHC@. Blog Ligação Home Center (2015) <https://blogligacaohomecenter.wordpress.com/2015/07/22/o-que-e-telhado-verde/>, Data de consulta: 08/01/2017.

Connelly, M., Hodgson, M. (2015). “Experimental investigation of the sound absorption characteristics of vegetated roofs”. Building and Environment, Vol.92, pp. 335-346.

Connelly, M. (2011). “Acoustical characteristics of vegetated roofs - contributions to the ecological performance of buildings and the urban soundscape”. Tese de Doutoramento, The Faculty of Graduate Studies, University of British Columbia, Vancouver, 1 vol..

CE@. Carnet des Escapades (2016) <http://www.carnetdescapades.com/2014/06/visiter-porto-week-end.html>, Data de consulta: 19/12/2016.

EA@. Engenharia Acústica (2017) <http://www.eac.ufsm.br/ensaios/absorcao-sonora-iso-10534-2>, Data de consulta: 31/01/201

Karteris, M., Mallinis, G., Tsiros, E. (2016) “Towards a green sustainable strategy for Mediterranean cities : Assessing the benefits of large-scale green roofs implementation in Thessaloniki , Northern Greece , using environmental modelling , GIS and very high spatial resolution remote sensing data”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, pp. 510-525.

Kubba, S. (2012). “Introduction: The Green Movement—Myths, History, and Overview”. *Handbook of Green Building Design and Construction*, pp. 1-19, Elsevier Inc., UK.

Le Corbusier (Pseudónimo de Charles Édouard Jeanneret). (1923). “Vers une Architecture”, Paris: G. Cres.

EGC@. European Green Capital (2016) <http://ec.europa.eu/environment/europeangreencapital/applying-for-the-award/evaluation-process/index.html>, Data de consulta: 17/11/2016.

FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau) (2002). “Guidelines for the Planning, Execution and Upkeep of Green-roof sites”. Alemanha.

FP@. Foster and Partners (2016) <http://www.fosterandpartners.com/projects/willis-faber-dumas-headquarters/>, Data de consulta: 13/12/2016.

GM@. Green Me (2016) <https://www.greenme.com.br/morar/bioarquitetura/2711-casas-teto-verde-islandia-candidatas-patrimonio-unesco>, Data de consulta: 09/01/2017.

H@. Hypescience (2011) <http://hypescience.com/monumentos-religiosos/>, Data de consulta: 02/12/2016.

Henry, A., Frascaria-Lacoste, N. (2012) “The green roof dilemma - Discussion of Francis and Lorimer (2011)”. *Journal of Environmental Management*, Vol. 104, pp. 91-92.

HT@. História Templodeapolo (2007) http://www.historia.templodeapolo.net/cidades_ver.asp?Cod_cidade=5&value=Ur&civ=Civiliza%C3%A7%C3%A3o+Sum%C3%A9ria, Data de consulta: 02/12/2016.

IGRA@ International Green Roof Association - Green Roof News (2016) http://www.igra-world.com/links_and_downloads/Igra-Green-Roof-News-1-2016.pdf, Data de consulta: 19/12/2016.

ITECONS@ Itecons Uc (2017) <http://www.itecons.uc.pt/index.php?module=divulg&id=5>, Data de consulta: 01/02/2017.

L@ Landezine (2015) http://www.landezine.com/index.php/2014/12/four-harbour-roof-park-by-buro-sant-en-co/four_harbour_roof_park-by-buro_sant_en_co-01/, Data de consulta: 23/01/2013

LANDLAB@. LANDLAB (2016) <http://www.landlab.pt/pt/produtos/C/coberturas-verdes>, Data de consulta: 23/01/2013.

MTS@. Morad Travel Services – Vienna (2016) <http://www.mts-vienna.com/guide/vienna/what-to-visit/hundertwasserhaus/>, Data de consulta 15/12/2016.

Osmundson, T., (1999) “Roof Gardens: History, Design and Construction”. W. W. Norton & Company Inc., Nova York, Estados Unidos da América.

Pittaluga, I., Schenone, C., Borelli, D. (2011). “Session 1aAA: Architectural Acoustics”. 162nd Meeting of the Acoustical Society of America, San Diego, California.

PPP@. *Palazzo Piccolomini Pienza* (2014) <http://www.palazzopiccolominipienza.it/palazzo.htm#giardino>, Data de consulta: 09/12/2016.

Rutt, R. L. H. e Gulsrud, M. N. (2016). “Green justice in the city: A new agenda for urban green space research in Europe.” *Urban Forestry & Urban Greening*. 19 pp. 123–127

SH@. Seu History (2014) <http://seuhistory.com/noticias/possivel-localizacao-dos-miticos-jardins-suspensos-da-babilonia-intriga-pesquisadores>, Data de consulta: 04/12/2016.

STI@. Serviços Técnicos de Impermeabilização e Reabilitação (2016) <http://www.stimpre.pt/portfolio/gulbenkian/>, Data de consulta: 19/12/2016.

Tadeu, A., Mateus, D., António, J., Godinho, L. e Mendes, P. (2010). “Acústica Aplicada”. Área científica de construções, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra

Thomas, R. (2003). "Green Roofs for Sustainable Cities - Sustainable Cities 2025" Environment Magazine, Issue October, pp. 6-9.

TIT@. Travelin In Tuscany (2016) <http://www.travelingintuscany.com/gardens/palazzopiccolomin.htm>, Data de consulta: 09/12/2016.

Van Renterghem, T., Forssén, J., Attenborough, K., Jean, P., Defrance, J., Hornikx, M., Kang, J. (2015). "Using natural means to reduce surface transport noise during propagation outdoors". Applied Acoustics, Vol. 92, pp. 86-101.

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

Van Renterghem, T., Botteldooren, D. (2011). "In-situ measurements of sound propagating over extensive green roofs". Building and Environment, Vol 46, Issue 3, pp. 729-738.

Van Renterghem, T., Botteldooren, D. (2009). "Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs". Building and Environment, Vol 44, Issue 5, pp. 1081-1087.

Van Renterghem, T., Botteldooren, D. (2008). "Numerical evaluation of sound propagating over green roofs". Journal of Sound and Vibration, Vol 317, Issue 3-5, pp. 781-799.

Vijayaraghavan, K. (2016). "Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends". Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.57, pp 740-752.

WHC@. World Heritage Convention – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (2017) <http://whc.unesco.org/en/tentativelists/5589/>, Data de consulta: 09/01/2017.

Xiao, M., Lin, Y., Han, J., Zhang, G. (2014). "A review of green roof research and development in China". Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 40, pp. 633-648.

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

Z@. Zinco (2017) http://www.zinco.pt/downloads/portal_tecnico.php#, Data de consulta: 09/01/2017
