

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE DOIS SISTEMAS
MODULARES DE TELHADOS VERDES
BRASILEIROS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Tenile Rieger Piovesan

**Santa Maria, RS, Brasil
2013**

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE DOIS SISTEMAS MODULARES DE TELHADOS VERDES BRASILEIROS

por

Tenile Rieger Piovesan

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Andrey Ricardo da Silva, PhD.

Coorientador: Prof. Dr. Stephan Paul

**Santa Maria, RS, Brasil
2013**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Piovesan, Tenile Rieger
Caracterização Acústica de dois Sistemas Modulares de
Telhados Verdes Brasileiros / Tenile Rieger Piovesan.-
2013.

97 p. ; 30cm

Orientador: Andrey Ricardo da Silva
Coorientador: Stephan Paul
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2013

1. Telhados Verdes 2. Absorção Sonora 3. Controle de
Ruído Ambiental I. Silva, Andrey Ricardo da II. Paul,
Stephan III. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE DOIS SISTEMAS MODULARES
DE TELHADOS VERDES BRASILEIROS**

elaborada por
Tenile Rieger Piovesan

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

Andrey Ricardo da Silva, PhD (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Stephan Paul, Dr. (UFSM)
(Coorientador)

Dinara Xavier da Paixão, Dr^a. (UFSM)

Maria Lygia Alves de Niemeyer, Dr^a. (UFRJ)

Santa Maria, 20 de dezembro de 2013.

Aos meus pais, Ivo e Véra Lucia, pelo apoio, carinho e amor transmitido incondicionalmente, em todos os momentos.

Aos meus ex e futuros alunos, principal motivação para o término deste curso.

E a todos que lutam pela preservação do meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente ao grande arquiteto do universo, Deus, sem o qual não seria nada. E pela Sua glória, força e luz para guiar sempre meu caminho.

Aos meus pais, que me deram a vida e batalharam sempre para deixarem a mim os maiores bens de todos: o amor, o conhecimento e a formação profissional.

Ao meu irmão Vinícios, pelo carinho e transmissor de alegria e tranquilidade.

A tia Gisela, pelo carinho e apoio prestado durante toda esta etapa.

Às amigas mestrandas Lívia Ribeiro Pavanello e Camila Fleck dos Santos, pelo carinho e amor, por me mostrarem o verdadeiro sentido da vida e serem o elo do maior presente que o ser humano poderia receber.

A todos meus amigos, familiares e clientes, pelo carinho e compreensão.

À direção do Centro de Tecnologia, professores e funcionários da UFSM, em especial à direção, professores e funcionários do PPGEC.

Aos professores Dr. Erasmo Felipe Vergara Miranda e Dr^a Dinara Xavier da Paixão, responsáveis pelo meu ingresso no Programa PPGEC-UFSM.

Ao meu professor orientador Andrey Ricardo da Silva, PhD, pela confiança em mim depositada, pelos ensinamentos, troca de experiências e apoio.

Ao meu coorientador Dr. Stephan Paul pelas explicações e amparo.

Ao coordenador do PPGEC professor Dr. Rinaldo Pinheiro, pela atenção e apoio.

À secretária do PPGEC Marília, pelo carinho e atenção em todos os momentos.

Ao Laboratório de Engenharia Acústica da UFSM, em especial aos funcionários Guerra, Eder e Bortoluzzi, pelo incansável apoio prestado.

Aos alunos do curso de Engenharia Acústica, em especial ao Ricardo, Vinícios, Luis Fernando e Henrique, pela ajuda com os equipamentos.

Ao aluno de Engenharia Civil David Moreira e os funcionários Sr. Guerra e Eder, pela ajuda na plantação das mudinhas de sedum.

Ao Laboratório de Solos do LMCC, principalmente ao Alison e seu João, pelo apoio na caracterização das propriedades físicas do substrato estudo.

À Empresa Ecotelhado, em especial ao Eng. Agrônomo João Manuel Linck Feijó, pela receptividade e patrocínio nos Sistemas Modulares.

À professora Dr^a Rutinéia Tassi pelo apreço, dedicação, apoio, e por dispor a esta pesquisa as plantinhas do sistema de telhado verde.

À professora Dr^a Jumaida Rosito, pelas explicações de taxonomia vegetal e características das plantas estudadas.

À professora Dr^a Sara R. Scotta Cabral, pela correção gramatical desse trabalho.

Ao amigo Maurício Secchi, pelos ensinamentos na língua estrangeira.

A todos meus colegas, em especial pelo carinho e pela companhia inseparável em todos principais momentos das amigas Mirdes, Aline e Angélica.

A todos meus alunos, em especial meus orientandos durante essa jornada, Antônio, Valdir, Sueli e Vitor, pela credibilidade em mim depositada, troca de experiências e apreço.

A todos, minha consideração e sincero obrigada.

“É preciso pensar um pouco nas pessoas que ainda vêm
Nas crianças
A gente tem que arrumar um jeito
De achar pra eles um lugar melhor.
Para os nossos filhos
E para os filhos de nossos filhos
Pense bem!

Deve haver um lugar dentro do seu coração
Onde a paz brilhe mais que uma lembrança
Sem a luz que ela traz já nem se consegue mais
Encontrar o caminho da esperança

Sinta, chega o tempo de enxugar o pranto dos homens
Se fazendo irmão e estendendo a mão

Só o amor muda o que já se fez
E a força da paz junta todos outra vez
Venha, já é hora de acender a chama da vida
E fazer a terra inteira feliz

Se você for capaz de soltar a sua voz
Pelo ar, como prece de criança
Deve então começar outros vão te acompanhar
E cantar com harmonia e esperança

Deixe que esse canto lave o pranto do mundo
Pra trazer perdão e dividir o pão

Só o amor muda o que já se fez
E a força da paz junta todos outra vez
Venha, já é hora de acender a chama da vida
E fazer a terra inteira feliz

Quanta dor e sofrimento em volta a gente ainda tem
Pra manter a fé e o sonho dos que ainda vêm
A lição pro futuro vem da alma e do coração
Pra buscar a paz, não olhar pra trás, com amor
Se você começar outros vão te acompanhar
E cantar com harmonia e esperança”

(*A Paz*, Roupas Nova
versão em português da música *Heal the World*, Michael Jackson)

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE DOIS SISTEMAS MODULARES DE TELHADOS VERDES BRASILEIROS

AUTORA: TENILE RIEGER PIOVESAN

ORIENTADOR: ANDREY RICARDO DA SILVA

COORIENTADOR: STEPHAN PAUL

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 20 de dezembro de 2013.

Este estudo teve como objetivo principal avaliar experimentalmente as propriedades como absorvedores sonoros de dois sistemas modulares de telhados verdes comumente utilizados no Brasil: alveolar simples e hexa. Este eclodiu da unificação de dois problemas agravantes, sendo a degradação do meio ambiente e ruído ambiental, partindo-se dos registros que telhados vegetados de forma geral possuem vários benefícios ambientais, inclusive acústicos. Foram analisados os dois sistemas com a mesma composição de substrato, porém com particularidades no esquema de montagem e plantas diferenciadas, isto é, grama no sistema alveolar e planta do tipo *sedum* no sistema hexa. Foram realizados experimentos de medição de absorção sonora de cada um dos sistemas, sendo duas medições considerando espessuras diferenciadas de substrato e uma medição do conjunto com planta. O procedimento experimental foi o método da câmara reverberante em campo difuso. Verificou-se que os substratos das amostras de todas as combinações investigadas possuem interessantes propriedades de absorção, por serem altamente porosos. O coeficiente de absorção sonora (α) máximo do sistema alveolar com 2,5cm de substrato foi de 1,0 em 1 kHz, e nas baixas frequências tem coeficientes próximos de 0,20. Já o sistema alveolar com 4 cm de substrato e o sistema hexa com *sedum* foram os que apresentaram, no geral, maiores valores no α em todas as faixas de frequência, além de apresentarem em termos de NRC os maiores valores, ou seja: 0,80 e 0,81 respectivamente. O α máximo no sistema alveolar com 4 cm de espessura do substrato atingiu 0,89 nas frequências de 1kHz, 2kHz e 2,5 kHz, e nas baixas frequências valores de α entre 0,25 à 0,32 nas frequências de 100 à 200 Hz; já no sistema hexa com espessura do substrato de 6cm com *sedum* o α máximo foi de 0,94 na frequência de 800Hz, e nas baixas frequências entre 0,16 a 0,26. O sistema alveolar com espessura de 4 cm com grama foi o que obteve maiores α nas baixas frequências de 100 a 200 Hz com valores de 0,31 a 0,38, sendo assim mais eficaz para absorção de ruído de tráfego. No geral, os coeficientes de absorção de todas as amostras dobraram o valor na faixa de 250 Hz em relação a 200 Hz. Os resultados obtidos indicam um alto coeficiente de absorção para tais equipamentos, o que sugere que a utilização de telhados verdes pode ser uma ótima alternativa de controle de ruído urbano.

Palavras-chave: Telhados Verdes. Absorção Sonora. Controle de Ruído Ambiental.

ABSTRACT

Masters Degree Dissertation
Graduate Program in Civil Engineering
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

ACOUSTIC CHARACTERIZATION OF TWO BRAZILLIAN SYSTEMS OF MODULAR GREEN ROOFS

AUTHOR: TENILE RIEGER PIOVESAN
ADVISOR: ANDREY RICARDO DA SILVA
CO-ADVISOR: STEPHAN PAUL

Place and Date of public defense: Santa Maria, December 20th 2013.

This study aimed to experimentally evaluate the properties as sound absorbers of two modular green roof systems commonly used in Brazil: the Alveolar simple and the modular Hexa. This study emerged from the unification of two aggravating problems, being the environment degradation and the environmental noise, given the records that vegetated roofs generally have several environmental benefits, including acoustic. The two systems were evaluated with the same substratum, but with different features and using distinct plants and assembly modes, that is, grass on the Alveolar system and plants of the *sedum* genus on the Hexa modular system. Measuring experiments of sound absorption have been made for each of the systems, consisting of two measurements with different substratum thickness and one measuring of the systems with *sedum* plants. The chosen experimental procedure was the method of reverberation chamber in a diffuse sound field. It was found that substrata of all the combinations of investigated samples have interesting absorption properties, due their porosity. The maximum sound absorption coefficient α of the Alveolar system with 2.5cm thick substratum was 1.0 at 1kHz, and the lower frequency coefficient are close to 0.20. The Alveolar system with 4 cm of substratum and the Hexa modular system with *sedum* plants were those which had, in general, higher values for α in all frequency bands, as well as showing the highest NRC values, in other words: values of 0.80 and 0.81 respectively. The maximum α in the Alveolar system with a layer of 4 cm thick substratum reached the value of 0.89 at frequencies of 1 kHz, 2 kHz and 2.5 kHz, and at the low frequencies from 100 Hz to 200 Hz the sample reached α values between 0.25 and 0.32; whereas the Hexa modular system with a 6cm substratum plus *sedum* the α values were 0.94 at a frequency of 800Hz, and between 0.16 and 0.26 at low frequencies. The 4cm thick Alveolar system with grass was the system which had higher α values in the frequencies of 100Hz and 200Hz, between 0.31 and 0.38, therefore being most efficient for traffic noise absorption. In general, the absorption coefficients of all samples doubled the value at the range of 250Hz, in comparison to the 200Hz frequency. The obtained results show a high absorption coefficient for such systems, which indicates that using green roofs can be an effective alternative of urban noise control.

Keywords: Green Roofs. Sound Absorption. Environmental Noise Control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1– Cobertura Palácio Gustavo Capanema-RJ.....	21
Figura 2.2 –Willis Faber & Dumas Headquarters-Londres.....	21
Figura 2.3 –Apartamentos Waldspirale- Alemanha	21
Figura 2.4 –Prefeitura de São Paulo- SP	21
Figura 2.5– Esquema telhado verde	24
Figura 2.6– Plantas comumente utilizada em telhados verdes no Brasil.....	26
Figura 2.7– Sistema hexa.....	27
Figura 2.8– Sistema alveolar	27
Figura 2.9– Incidência normal do coeficiente de absorção sonora de substratos em condição seca	37
Figura 2.10– Balanço energético do som que incide sobre uma superfície	38
Figura 2.11– Definição do tempo de reverberação. Faixa de avaliação de 30 dB para o cálculo do T30 indicado	42
Figura 3.1– Esquema planta baixa câmara reverberante UFSM	48
Figura 3.2– Esquema perspectiva câmara reverberante UFSM	48
Figura 3.3– Vista câmara reverberante UFSM.....	49
Figura 3.4– Esquema da medição do tempo de reverberação pelo método de ruído interrompido	50
Figura 3.5– Esquematização do Ensaio	51
Figura 3.6– Esquema experimento 01-Alveolar com substrato de 2,5 cm	54
Figura 3.7– Esquema experimento 02-Alveolar com grama	54
Figura 3.8– Esquema experimento 03-Alveolar com substrato de 4 cm	55
Figura 3.9– Esquema experimento 04-Hexa com substrato de 4 cm	55
Figura 3.10– Esquema experimento 05-Hexa com substrato de 6 cm	56
Figura 3.11–Esquema experimento 06- Hexa com <i>sedum</i>	56
Figura 4.1– Esquema ensaio câmara reverberante vazia	59
Figura 4.2– Esquema ensaio câmara reverberante com amostra.....	59
Figura 4.3– Experimentos 01, 02 e 03- Etapas montagem sistema alveolar	60
Figura 4.4– Experimentos 04, 05 e 06- Etapas montagem sistema hexa	62
Figura 4.5– Experimento 01- Coeficientes de absorção sonora do sistema alveolar simples com 2,5 cm de substrato	66
Figura 4.6– Experimento 02- Coeficientes de absorção sonora do sistema alveolar simples com grama	67
Figura 4.7– Experimento 03- Coeficientes de absorção sonora do sistema alveolar simples com 4 cm de substrato	68
Figura 4.8– Experimento 04- Coeficientes de absorção sonora do sistema hexa com 4 cm de substrato	68
Figura 4.9– Experimento 05- Coeficientes de absorção sonora do sistema hexa com 6 cm de substrato	69

Figura 4.10– Experimento 06- Coeficientes de absorção sonora do sistema hexa com <i>sedum</i>	69
Figura 4.11– Comparação dos coeficientes de absorção sonora do sistema alveolar simples	70
Figura 4.12– Comparação dos coeficientes de absorção sonora do sistema hexa.....	71
Figura 4.13– Comparação dos coeficientes de absorção sonora de todos os experimentos..	72
Figura 4.14– Coeficientes de absorção sonora das amostras com <i>sedum</i>	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1– Classificação dos sistemas de telhados verdes segundo seus componentes.....	23
Tabela 2.2 – Benefícios da natureza.....	29
Tabela 2.3 – Coeficientes de absorção sonora de materiais porosos e fibrosos	39
Tabela 2.4 – Coeficientes de absorção sonora de materiais e de revestimentos de superfícies	40
Tabela 3.1– Especificações das medições	53
Tabela 4.1– Área de absorção equivalente da câmara reverberante, sem amostra.....	63
Tabela 4.2– Coeficiente de absorção sonora das amostras dos experimentos 01, 02 e 03....	64
Tabela 4.3– Coeficiente de absorção sonora das amostras dos experimentos 04, 05 e 06....	65
Tabela 4.4– Coeficiente de redução sonora- NRC- dos experimentos.....	65
Tabela 4.5– Comparação dos experimentos de telhado verde com materiais absorventes ...	74
Tabela 4.6– Comparação dos experimentos de telhado verde com outras coberturas	75
Tabela 4.7– Comparação dos experimentos de telhado verde com resultados de experimentos de telhado verde obtidos em outros países	77

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATV Brasil – Associação Telhados Verdes Brasil
dB – Decibel;
dB(A) – Decibel com ponderação no filtro A
GBC – *Green Building Council*
GBC Brasil – *Green Building Council Brasil*
GW– Gigawatts
Hz – Hertz
IGRA – *International Green Roof Association*
IPR – Índice Ponderado de Ruído
IPTU – Imposto Predial Territorial Urbano
ISO – *International Standards Organization*
kHz – quilohertz
LEAC– Laboratório de Engenharia Acústica
LEED – *Leadership in Energy and Environmental Design*
MNPS– Medidor de Nível de Pressão Sonora
NC– Níveis de Critério
NRC – Coeficiente de Redução Sonora
TR– Tempo de Reverberação
UFMS – Universidade Federal de Santa Maria
WHO – *World Health Organization*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Justificativa	16
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 Estrutura da dissertação	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Telhados verdes: a crescente utilização	19
2.1.1 Contexto histórico.....	19
2.1.2 Conceito e tipologias gerais.....	21
2.1.2.1 Telhados verdes extensivos	22
2.1.2.2 Telhados verdes intensivos	22
2.1.2.3 Sistema completo.....	24
2.1.2.4 Sistema modular	27
2.1.3 Benefícios gerais.....	28
2.1.4 Políticas públicas de incentivo	30
2.1.4.1 Internacionais.....	30
2.1.4.2 Brasileiras	31
2.2. Telhados verdes e controle de ruído	33
2.2.1 Ruído urbano	33
2.2.2 Legislação de controle de ruído externo.....	35
2.2.3 Contexto de uso de telhados verdes em controle do ruído urbano	35
2.2.4 Absorção sonora	37
2.2.4.1 Definição	38
2.2.4.2 Coeficiente de absorção sonora	38
2.2.4.3 Tempo de reverberação	41
2.2.4.4 Coeficiente de redução sonora	43
2.2.4.5 Coeficiente de absorção de telhados verdes com vegetação	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 Procedimentos experimentais	45
3.1.1 Método de cálculo do coeficiente de absorção sonora pela câmara reverberante	45
3.1.2 Local de realização dos ensaios	47
3.1.3 Equipamentos utilizados e seu posicionamento	49
3.1.3.1 Condições ambientais no interior da câmara reverberante	51
3.1.4 Montagem do experimento	52
3.1.4.1 Módulos experimentais.....	52
4. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS	58
4.1 Procedimentos experimentais	58
4.1.1 Medições das amostras do sistema modular alveolar simples de telhado verde	59
4.1.2 Medições das amostras do sistema modular hexa de telhado verde.....	61
4.1.3 Cálculo do coeficiente de absorção sonora	63

4.2 Análise dos resultados das medições das amostras de telhado verde	66
4.2.1 Análise individual dos resultados acústicos das medições das amostras de telhado verde	66
4.2.2 Análise comparativa dos resultados acústicos das medições das amostras de telhado verde	70
4.2.2.1 Análise comparativa dos resultados acústicos das medições das amostras de telhado verde com materiais absorventes e outros tipos de coberturas	74
4.2.2.2 Análise comparativa dos resultados acústicos das medições das amostras de telhado verde com resultados de experimentos de telhado verde obtidos em outros países	76
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
5.1 Conclusão	78
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
APÊNDICES	88
ANEXOS	95

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

A questão ambiental, ligada ao desenvolvimento sustentável e a preocupação com o futuro do planeta, vem assumindo um posicionamento desde a época da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento Humano, a Rio 92, e posteriormente na Agenda 21 para a construção sustentável (HUNTER, 1999).

Há alterações impactantes no ecossistema que causam seu desequilíbrio como consumo de energia, dissipação de calor, impermeabilização de solos, microclimas, destruição de *habitats*, extinção de espécies da fauna e da flora, além da exacerbada produção de resíduos sólidos, líquidos e gasosos, estes indevidamente despejados, acúmulo de carbono e poluição atmosférica e sonora (DIAS, 2002).

A Lei Federal nº 10.257/2001- Estatuto da Cidade- que regulamenta os Arts. 182 e 183 da Constituição Federal estabelece diretrizes gerais da política urbana, as quais devem dispor sobre o desenvolvimento das funções sociais das aglomerações urbanas através da garantia do direito a cidades sustentáveis, ao planejamento, à ordem e ao controle do uso do solo, monitorando “a edificação ou o uso excessivo ou inadequado em relação à infraestrutura urbana”. De mesma forma, a Lei Estadual nº 11.520/2000, que institui o Código Estadual do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul, no art. 163, descreve que, nas construções, devem ser tomadas medidas para evitar a destruição ou degradação da vegetação original e, quando isso não for possível, “é obrigatória a implementação de medidas compensatórias que garantam a conservação de áreas significativas desta vegetação”.

Uma solução para minimizar os efeitos de degradação e compensar o meio ambiente é o telhado verde. Segundo Van Renterghem e Botteldooren (2011), Connelly (2011) e Yang, Kang e Choi (2012), o telhado possui benefícios ecológicos e econômicos bem reconhecidos. Está sendo adotado em muitos países, principalmente na Europa e, aos poucos, vem ganhando espaço em alguns estados do Brasil.

Existem muitas razões para a construção de telhados verdes, dentre elas promover a biodiversidade (LAGSTRÖM, 2004; BREINNEISEN, 2006), ajudar nos sistemas sustentáveis de drenagem urbana (LAGSTRÖM, 2004; BERNDTSSON, 2010), reduzir a temperatura,

promovendo o conforto térmico (LAGSTRÖM, 2004; MINKE, 2004), diminuir o consumo de energia (SANTAMOURIS et al, 2007), aumentar a absorção de dióxido de carbono (YANG.; YU; GONG, 2008; GETTER et al, 2009) e melhorar a qualidade do ar. Também é esteticamente agradável e, acredita-se que o telhado verde pode reduzir o escoamento das águas pluviais e aumentar a biodiversidade, sendo uma solução para as ilhas de calor urbano e a poluição do ar (YANG; KANG; CHOI, 2012). Esses telhados podem reduzir os níveis de pressão sonora na paisagem urbana (CONNELY, 2011; VAN RENTERGHEM; BOTTELDOOREN, 2011) e absorver as ondas sonoras difratadas (YANG; KANG; CHOI, 2012).

O aumento da poluição sonora, especialmente nos centros urbanos, pode causar graves consequências para o estado de saúde da população, dentre as quais estresse, distúrbios do sono, cansaço, problemas de pressão alta, e conseqüentemente, problemas cardíacos, ou até mesmo a perda auditiva (LAGSTRÖM,2004).

Diante das questões supracitadas, pretende-se associar o telhado verde ao estudo acústico, visto que as empresas fornecedoras desses telhados alegam que estes possuem propriedades relativas a esta questão. Entretanto, não existem dados concretos no Brasil em relação aos estudos das características acústicas e nem da utilização, do ponto de vista arquitetônico, para redução e controle dos níveis de pressão sonora. Dessa forma, apoiado em Van Renterghem e Botteldooren (2011), que sugerem que uma caracterização acústica detalhada das várias camadas constituintes de um telhado verde pode levar a uma melhor compreensão e otimização dos recursos de redução de ruído, busca-se verificar se os telhados verdes comumente encontrados no Brasil são adequados como absorvedores sonoros, e, posteriormente, comparar os resultados com a bibliografia internacional existente, predizendo seu potencial para o controle de ruído urbano. Os telhados a serem verificados são dois sistemas modulares extensivos produzidos pela empresa Ecotelhado: Alveolar Simples e Hexa, pela sua crescente disseminação, facilidade de montagem, baixa manutenção, custo recuperável pela economia de energia, pouca sobrecarga na estrutura e presença de membrana antirraízes como camada impermeabilizante.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar experimentalmente as propriedades como absorvedores sonoros de telhados verdes.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar, em termos de coeficiente de absorção sonora, o comportamento acústico de dois sistemas modulares de telhados verdes brasileiros: hexa e alveolar simples;
- Realizar análise comparativa, a partir de resultados obtidos nos experimentos, entre os dois tipos de telhados verdes;
- Comparar os resultados encontrados nos experimentos dos dois telhados verdes brasileiros com os resultados acústicos de telhados verdes já obtidos em outros países.

1.3 Estrutura da Dissertação

O trabalho foi estruturado em cinco capítulos, dispostos da seguinte forma:

Capítulo 01 – Introdução, onde se apresenta a contextualização, o tema da pesquisa, a proposição dos objetivos e o modo como está estruturada a dissertação.

Capítulo 02 – Fundamentação teórica, onde se pode observar a revisão de literatura que embasou o desenvolvimento do trabalho.

Capítulo 03 – Materiais e métodos, que descreve as amostras, o local onde foi realizada a pesquisa, os aspectos normativos, bem como os procedimentos para a obtenção dos resultados.

Capítulo 04 – Avaliação experimental das propriedades acústicas, onde se descrevem os procedimentos experimentais, os resultados obtidos para cada amostra com suas respectivas análises e comparação com outros resultados acústicos de telhados verdes encontrados na literatura.

Capítulo 05 – Considerações Finais, que sintetizam a conclusão de acordo com a questão da pesquisa e os objetivos da dissertação, bem como as recomendações para trabalhos futuros.

No final, apresentam-se as referências bibliográficas adotadas, os apêndices e os anexos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo retrata a importância da utilização dos telhados verdes, sua crescente utilização e sua importância no controle de ruído. O primeiro subcapítulo, por meio de referências procura demonstrar, em um breve contexto histórico, o emprego das coberturas vegetadas nas construções desde os tempos primórdios, os conceitos e tipologias gerais, os benefícios para os indivíduos e o meio ambiente e seu incentivo através de políticas públicas em vários países.

O segundo subcapítulo revela o problema de ruído urbano e suas implicações, e apresenta a aplicação de telhados verdes como forma mitigadora para controle de ruído. Além disso, apresenta os conceitos dos termos acústicos utilizados nesse trabalho, como por exemplo, a absorção sonora.

2.1 Telhados verdes: a crescente utilização

2.1.1 Contexto histórico

Os telhados verdes, chamados “tetos verdes, tetos jardins, lajes jardins, terraços jardins, coberturas verdes, jardins suspensos” (CAETANO; TIBIRIÇÁ; SANTOS, 2010) ou “coberturas jardins” (ALMEIDA, 2008) têm sua história iniciada desde a antiguidade. Acredita-se que os primeiros telhados verdes construídos seriam os famosos Jardins suspensos da Babilônia, uma das sete maravilhas do mundo antigo, que foram construídos entre os séculos 800 a.C. e 600 a.C. (GRANT et al, 2003).

No decorrer da história foram encontrados jardins de cobertura: nas ruínas de Herculano romano, soterradas por meio de uma erupção do Vulcão Vesúvio em 79 d.C.; no início da Idade Média, no Monte Saint Michel na Normandia-Noroeste da França; na Renascença, no Palazzo Piccolomini em Pienza, na Itália, construído acompanhando a inclinação do relevo (GRANT et al, 2003) e na Torre de Guinigi em Lucca, na Itália, com um jardim suspenso a uma altura de quase 40 metros sobre o nível da cidade (ROLA, 2008).

Nesse período, essas coberturas eram comuns na cidade de Gênova, na Itália, assim como no período pré-colombiano e em outros países, como México, Índia (por volta do século XVI) e em algumas cidades espanholas.

Em 1488, Leonardo da Vinci elaborou um dos primeiros projetos formais sobre coberturas ajardinadas no espaço urbano. A partir do século XVIII, essas coberturas começaram a surgir em algumas cidades francesas. Já na Rússia, os jardins nas coberturas representavam sinal de luxuosidade da nobreza, como o Palácio do Kremlin com dois níveis de jardins suspensos (ALMEIDA, 2008).

O termo “coberturas jardins” foi criado próximo de 1893, especificamente para áreas ajardinadas, as quais eram utilizadas para recreação no verão americano. Como exemplo, têm-se os teatros em Nova Iorque que ainda possuem em seus nomes referência a essa época, como o “*Winter Garden*” e o “*Madison Square Garden*” (ALMEIDA, 2008).

Le Corbusier foi talvez o primeiro a usar coberturas verdes mais sistematicamente, quando formulou os cinco princípios do movimento modernista, entre eles os terraços jardins. No Brasil, as coberturas vegetadas surgiram a partir do Movimento Modernista iniciado na década de 1930, tendo como marco principal o prédio conhecido por Palácio Gustavo Capanema, no Rio de Janeiro (Figura 2.1)¹, projetado por Le Corbusier, Oscar Niemeyer e Lúcio Costa, e paisagismo de Burle Max (ROLA, 2008).

Na década de 1960, alguns complexos de escritórios na Suíça incluíram jardins na cobertura como Grosse Schanze Park e Ciba Geigy Building. Com o avanço da tecnologia, os arquitetos tiveram maior confiança para elaborar jardins de cobertura durante os anos de 1970, quando começaram a se difundir na Escandinávia, Alemanha, Suíça e Estados Unidos (WHALLEY, 1978). No Reino Unido, o exemplo mais conhecido é o edifício “Willis Faber e Dumas” (Figura 2.2)², classificado como Patrimônio Inglês.

Há cerca de trinta anos as técnicas de telhado verde foram readotadas na Alemanha. Desde então, o uso de telhados verdes está em crescimento devido a exigências legais e incentivos fiscais, e vêm se tornando cada vez mais populares em toda a Europa, em grande parte devido ao efeito positivo sobre o meio ambiente (VELAZQUEZ, 2002 *apud* LAGSTRÖM, 2004, p. 20). Um exemplo é o prédio de apartamentos Waldspirale (Figura 2.3)³, concluído em 2000, em Darmstad (ROLA, 2008). No Brasil, aos poucos o sistema está

¹ Disponível em: <<http://www.construblog.com.br/wp-content/uploads/2011/08/burle-marx-palacio-gustavo-capanema.jpg>>. Acesso em: 26 dez.12.

² Disponível em: <<http://www.fosterandpartners.com/content/projects/0102/38047.jpg>>. Acesso em: 26 dez.12.

³ Disponível em: <http://greenapple.ca/blog/wpcontent/uploads/2009/08/Darmstadt_Waldspirale_1.jpg>. Acesso em: 26 dez.12.

sendo utilizado, sendo que um de seus maiores telhados verdes é o da prefeitura de São Paulo (Figura 2.4) ⁴ com mais de 300m² de área de vegetação com várias espécies de plantas inclusive árvores de grande porte como palmeiras-jerivá e pau-brasil, consistindo numa tipologia intensiva.



Figura 2.1- Cobertura Palácio Gustavo Capanema-RJ



Figura 2.2- Willis Faber & Dumas Headquarters-Londres

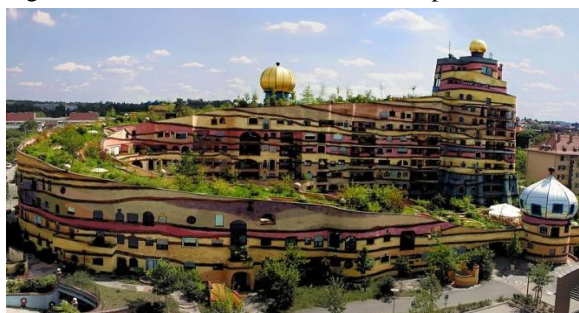


Figura 2.3- Apartamentos Waldspirale- Alemanha



Figura 2.4- Prefeitura de São Paulo- SP

A partir dos anos 90, as questões ecológicas passaram a ter uma grande influência na produção arquitetônica, tornando a utilização das coberturas verdes mais que uma solução estética (ALMEIDA, 2008).

2.1.2 Conceito e tipologias gerais

Telhado verde é uma técnica usada em arquitetura e construção que consiste em um teto vivo com plantas, configurando um jardim sobre a cobertura das edificações, o que contribui para a promoção das áreas verdes no meio urbano.

⁴ Disponível

em:<http://1.bp.blogspot.com/_JV1YV9rBQX4/SvyHkcrNzxI/AAAAAAAAAGg/JrAjsOc9n4A/s320/Prefeitura%2520de%2520Sao%2520Paulo.jpg>. Acesso em: 26 dez. 12.

O telhado verde é composto de um conjunto de elementos construtivos. De acordo com Almeida (2008, p.13), a maioria possui a mesma funcionalidade em “estrutura de suporte, camada de proteção contra água de chuva, proteção térmica, drenagem, substrato e vegetação”.

Segundo Vergara, Pippi e Barbosa (2009, p. 2) o telhado é constituído de “uma cobertura de vegetal plantada em solo leve”, que deve possuir barreira contra raízes, reservatório de drenagem e membrana à prova de água. Pode ser classificado em dois grupos de acordo com características do tipo de substrato e vegetação: extensivo ou intensivo (GETTER *et al*, 2009; CRUZ e ZANIN, 2010).

2.1.2.1 Telhados verdes extensivos

Para Cruz e Zanin (2010) coberturas verdes extensivas possuem entre 8 e 12cm de substrato, onde o peso do sistema é variável considerando-se uma média de 150kg/m² quando saturado e não requerem reforços significativos na estrutura de edificação. As plantas mais indicadas para esta camada de solo são as gramíneas ou pequenas arbustivas.

Complementam Van Renterghem e Botteldooren (2008) que telhados verdes extensivos necessitam de uma fina camada de solo ou substrato. Eles apoiam baixo crescimento para as plantas que são extremamente tolerantes à seca e ao sol, como espécies de *sedum* e gramíneas. Esses telhados possuem espessuras de substrato por volta de 5 cm a 15-20 cm. Já para Getter *et al* (2009), sua espessura é com pouca profundidade, menor que 15 cm, exigindo mínima manutenção.

2.1.2.2 Telhados verdes intensivos

Coberturas intensivas são aquelas que possuem camadas a partir de 20 cm de substrato, cuja sobrecarga estrutural pode variar quando saturado, onde se pode cultivar vegetação de médio e grande porte (CRUZ; ZANIN, 2010). De natureza igual, para a Associação Internacional de Telhados Verdes - IGRA (2012), estes telhados precisam de uma estrutura que comporte maior capacidade de carga, pois precisam de uma camada de solo que

geralmente é encontrada entre 15 a 40 cm e a carga prevista pode variar de 180 Kg/m² a 500 Kg/m².

Telhados verdes intensivos exigem maior profundidade do solo e podem conter arbustos ou até mesmo árvores, assim como em jardins convencionais. A espessura do substrato é tipicamente entre 20 e 60 cm e, devido ao seu grande peso, podem ocorrer problemas de construção (VAN RENTERGHEM; BOTTELDOOREN, 2008). Getter *et al* (2009) complementam que estes telhados necessitam de constante manutenção.

Telhados intensivos são elaborados em telhados planos, não sendo possíveis em inclinados devido à espessura, e precisam de cuidados especiais como, por exemplo, irrigação e nutrientes, o que o torna um sistema com custos mais elevados (MINKE, 2004).

Outro sistema que há, segundo Rola (2008), é o telhado semi-intensivo, onde compreende as características dos telhados verdes intensivos e extensivos. Para a IGRA (2012), os critérios descritos a seguir podem ser utilizados na caracterização dos sistemas (Tabela 2.1).

Tabela 2.1– Classificação dos sistemas de telhados verdes segundo seus componentes

Itens	Telhado Verde extensivo	Telhado Verde semi-intensivo	Telhado Verde intensivo
Manutenção	Baixa	Periodicamente	Alta
Irrigação	Não	Periodicamente	Regularmente
Plantas	<i>Sedum</i> , ervas e gramíneas	Gramas, ervas e arbustos	Gramado, arbustos e árvores
Altura do sistema	60 - 200 mm	120 - 250 mm	150-400 mm
Peso	60-150 kg / m ²	120-200 kg / m ²	180-500 kg / m ²
Custo	Baixo	Médio	Alto
Uso	Camada de proteção ecológica	Projetado para ser um telhado verde	Parque igual a um jardim

Fonte: Adaptado ao português (IGRA, 2012).

Todos os sistemas supracitados apresentam muitas vantagens ambientais, porém os extensivos são considerados “eco-eficientes [sic], pois contribuem para o conforto ambiental e eficiência energética, sem despenderem grande quantidade de recursos externos para a sua construção e manutenção” (ALMEIDA, 2008, p.12).

2.1.2.3 Sistema completo

O Sistema Completo é o mais utilizado e difundido mundialmente e consiste na ordenação das principais camadas de baixo para cima. Para Berndtsson (2010), a construção consiste geralmente em quatro camadas: material de impermeabilização, membrana de absorção para prevenir a perda de partículas do solo, substrato e vegetação (Figura 2.5).

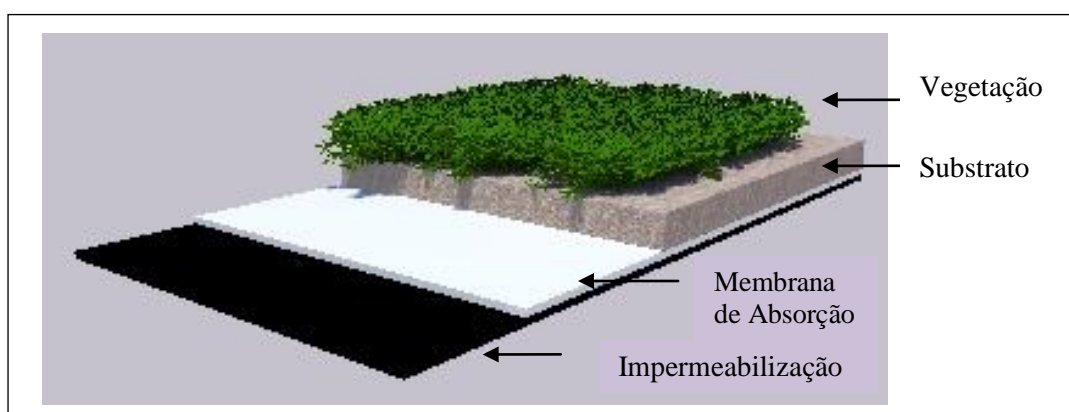


Figura 2.5– Esquema Telhado Verde

A camada de impermeabilização é aquela que tem como função a proteção contra umidade e infiltrações para a estrutura, tornando-a assim estanque (ROLA, 2008). Os impermeabilizantes que existem no Brasil são a manta de PVC, manta asfáltica e manta de polietileno; nesta última enquadra-se o Polietileno de Alta Densidade – PEAD, muito utilizado por possuir um baixo nível de ramificações, com alta densidade e altas forças intermoleculares para evitar que as raízes das plantas prejudiquem a estrutura suporte.

A membrana de absorção ou camada de drenagem tem por função absorver a precipitação e drenar qualquer excesso de água. Conforme Almeida (2008), para facilitar o escoamento adequado, esta camada deve ser de materiais de alta granulometria e porosos, como, por exemplo, argila expandida, areia ou vermiculita.

Para Minke (2004), esta camada, além de ter a função de drenar o líquido excedente, também tem a função de armazenar o líquido, se necessário. Materiais minerais porosos e leves, grãos graúdos, argila expandida, ardósia expandida, pedra-pome, materiais reciclados de escórias e tijolo são utilizados para drenar. Para ocorrer um bom armazenamento e drenagem deve-se utilizar materiais de poros abertos, como, por exemplo, a argila expandida.

Outro material que serve para drenagem é a lã mineral, além de ajudar na absorção do nível de ruído. Segundo estudos, ela é eficaz na retenção de escoamento de água para fora, com a vantagem de ser mais leve que o cascalho. Para o sistema de telhado verde oferece uma boa alternativa, principalmente em telhados inclinados, onde impede o deslizamento das plantas. (LAGSTRÖM, 2004). Telhados com inclinações mais elevadas necessitam de cuidados especiais para evitar o deslizamento do substrato (MINKE, 2004).

O substrato é a mistura de solos e substâncias orgânicas e minerais, e serve como suporte da vegetação, onde as plantas fixam suas raízes e onde o líquido que disponibiliza os nutrientes às plantas é retido. Os substratos, para Rola (2008), são importantes por consistirem misturas controladas que podem ser preparadas de acordo com o tipo de planta a ser utilizada. Eles apresentam inúmeros benefícios como, por exemplo, capacidade viável de fornecer água para as raízes, ser isento de pragas e propiciar plantas saudáveis. A espessura do substrato depende do tipo de planta e também é limitada, na prática, pelo peso permitido, em situação saturada, na construção do telhado verde.

A camada de vegetação, para Almeida (2008), é o componente mais importante do conjunto a ser determinado, pois depende de variáveis funcionais, estéticas e climáticas. Para telhados verdes, as espécies vão das crassuláceas - armazenam água em suas suculentas folhas- às famílias das agaváceas, bromeliáceas e cactáceas, entre outras, mais conhecidas por plantas suculentas. Estas plantas suculentas (Anexo A), principalmente as da família das crassuláceas, são exemplos de espécies xerófitas, ou seja, plantas que sobrevivem com pouca água. São as mais adequadas para sistemas extensivos, por terem a capacidade de armazenar água em suas células. Essas plantas acabam sendo ideais nos telhados verdes por serem resistentes às secas e diferentes condições climáticas, além de exigirem pouca manutenção. Quanto às gramíneas, as plantas com raízes fasciculadas são as mais indicadas neste caso por serem longas e finas.

Na Europa, as plantas mais utilizadas nesses telhados são as suculentas, geralmente as *Sedum*, que são resistentes e tolerantes à seca e atraem com o néctar de suas flores abelhas e borboletas, tornando os ambientes mais aprazíveis (GRANT *et al*, 2003). No Brasil os telhados verdes são concebidos a partir de várias plantas. As suculentas são as preferidas, mas as gramíneas também são utilizadas, assim como leiva nativa (VERGARA; PIPPI; BARBOSA, 2009), *Gazania rigens* e *Kalanchoe bossfeldiana*, com exigência de poucas regas (SILVA *et al*, 2010), entre outras como podem ser observadas na Figura 2.6.



Figura 2.6– Plantas comumente utilizada em telhados verdes no Brasil

De acordo com a morfologia vegetal, a avaliação de uma planta pode ser de forma subjetiva, isto é, se sua folha é coriácea - sua textura é semelhante a couro e se quebra facilmente -, carnosa- suculenta-, membranácea - semelhante a uma membrana, ou seja, muito delgado e meio flexível- depende também da forma e textura, área, entre outros.

A grama esmeralda (*Zoysia japônica*), por exemplo, é classificada como herbácea rizomatosa, perene, com folhas estreitas, pequenas, lineares, dispostas em hastes curtas e densas, exige podas menos frequentes (LORENZI; SOUZA, 2001). Já o *sedum* rupestre (*Sedum reflexum*), é uma espécie de planta perene e suculenta da família crassulácea; possui altura aproximada até 10 cm, com caules e folhagem de formato estrelado, com tecido suave e macio, sendo muito tolerante à seca e exigindo pouca manutenção.

2.1.2.4 Sistema modular

O Sistema Modular é o “sistema completo” só que desenvolvido em pequenos módulos (caixas), onde quase todas as camadas do sistema completo, com exceção do impermeabilizante, são montadas de forma “completa” e, somente após a consolidação da vegetação é que os módulos são instalados em cima do telhado, já impermeabilizado. Este sistema apresenta-se em espessuras que vão de 7,5 cm a 30 cm. (ROLA, 2008, p.99)

No mercado brasileiro, há módulos fabricados pela Empresa Ecotelhado, com sede no Rio Grande do Sul, e a Empresa Instituto Cidade Jardim, com sede em São Paulo. Na empresa Ecotelhado existem quatro sistemas modulares: sistema laminar, sistema hexa, sistema alveolar e sistema galocha. Nesta pesquisa, serão enfocados dois dos sistemas comumente utilizados: o hexa (Figura 2.7) e o alveolar simples (Figura 2.8)⁵.

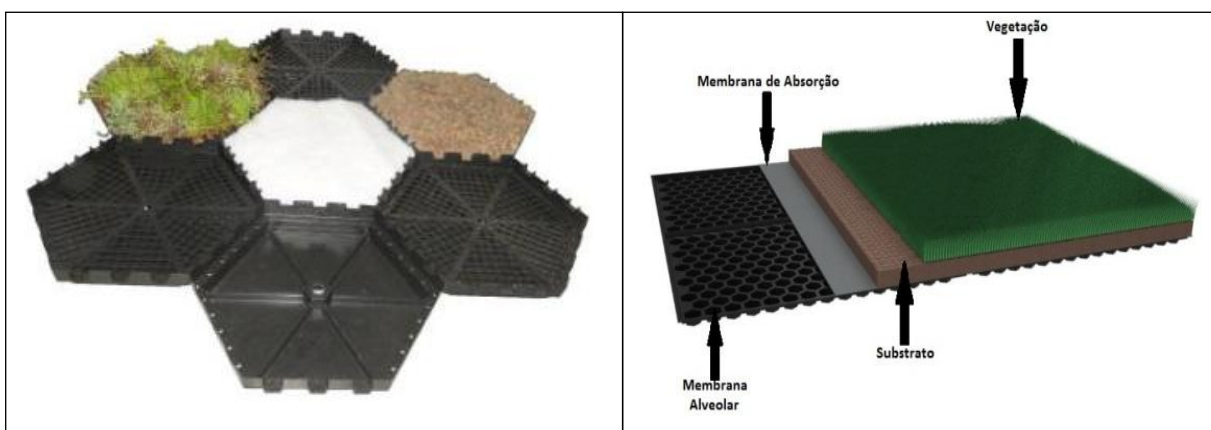


Figura 2.7– Sistema hexa
Fonte: Ecotelhado, 2010 a.

Figura 2.8– Sistema alveolar

O sistema hexa, segundo a Ecotelhado (2010a), compreende módulos de plástico reciclado em formato hexagonal com encaixe macho-fêmea, com espessura de 1,5mm e área de 0,1624m² em cada peça. O aproveitamento é de 6,16 peças/m², e o peso do módulo, quando se utiliza vegetação de forração, é cerca de 50kg/m². Esse sistema é formado pelas camadas: membrana de proteção antirraízes, módulo hexa de plástico reciclado, primeira camada de membrana de retenção de nutrientes, vegetação de gramíneas, suculentas ou outras.

⁵ Disponível

em: <<http://www.ecotelhado.com.br/Port/ecotelhado/sistemaalveolar/SiteAssets/default/Alveolar%20Simples%20-%20Camadas%20-%20Indica%C3%A7%C3%B5es.jpg>>. Acesso em: 16 jan. 13.

O sistema alveolar simples consiste na carga do sistema já saturado de água varia de 35 a 60kg/m², se forem utilizadas gramíneas de forração. Compreende módulos alveolares fornecidos em placas pretas de plástico reciclado semiflexíveis e possui minirreservatórios de formato hexagonal nas dimensões de 1,16 x 0,89m. Tem a mesma finalidade do módulo do sistema hexa, porém retém apenas 10 l/m² (ECOTELHADO, 2010b).

Nesses sistemas a escolha das vegetações é opcional e subjetiva, mas geralmente é influenciada pela espessura do substrato e pela sua utilização. Para o sistema alveolar simples, por possuir uma camada mais fina, e conseqüentemente substrato também menos espesso, não pode sustentar plantas com raízes profundas, por isso é muito utilizado com forrações, como por exemplo, gramas. Já o Sistema hexa é muito utilizado com plantas suculentas, como do gênero *sedum*, por possuir uma capacidade de profundidade um pouco maior em seu sistema e por essas plantas serem difundidas mundialmente pela sua importância em resistência, tolerância e baixa manutenção.

2.1.3 Benefícios gerais

Telhados verdes possuem vantagens ecológicas (CONNELLY, 2011; YANG; KANG; CHOI, 2012) e econômicas (LAGSTRÖM, 2004). Existem muitos estudos científicos, a respeito desses telhados, na área de isolamento térmico, onde apresentam a redução no consumo e custo de energia (SANTAMOURIS *et al*, 2007), bem como redução no efeito das ilhas de calor urbano (FENG; MENG; ZHANG, 2010).

De acordo com Getter *et al* (2009), os telhados vegetados são uma solução mitigadora para a mudança climática; seu uso diminui a demanda da utilização de ar condicionado, pelo fato de deixarem o ambiente mais agradável termicamente, e assim, menos dióxido de carbono é liberado nas usinas de energia e fornos. Além disso, representam pequeno, mas significativo potencial de sequestro de carbono em ambientes urbanos. Segundo Taha (1996), esses telhados podem contribuir para uma melhoria na qualidade do ar, direta ou indiretamente. A constituição das plantas (como suas folhas e ramos) possui a capacidade de filtrar as partículas em suspensão no ar.

Coberturas verdes também armazenam considerável quantidade de água, reduzindo assim expressivamente o escoamento das águas das chuvas, auxiliando na sua evapotranspiração e facilitando na gestão de drenagem urbana (LAGSTRÖM, 2004;

BERNDTSSON, 2010). Dessa forma, consistem principalmente superfícies impermeáveis e ajudam a reduzir os riscos de inundações nas cidades.

Para Minke (2004), os telhados verdes também influenciam a melhoria das condições atmosféricas do ar e da temperatura, otimizando o isolamento térmico, o armazenamento de calor da edificação e o isolamento acústico. Além disso, produzem oxigênio e absorvem gás carbônico e partículas nocivas, filtram partículas de sujeira e poeira no ar, reduzem as variações de umidade no ar, protegem contra a luz solar intensa, fornecem alojamento para insetos como, por exemplo, borboletas, favorecendo a biodiversidade, são atraentes e podem influenciar o bom humor nas pessoas.

O verde torna as cidades mais atraentes e agradáveis (OBERNDORFER *et al*, 2007), como pode ser visto no resultado de muitas pesquisas que mostram a importância da vegetação para o relaxamento e a diminuição da pressão arterial das pessoas. Esses telhados são benéficos para biodiversidade, à medida que aumentam a área biológica em comparação com as tradicionais coberturas que são rígidas (LAGSTRÖM, 2004). Connelly (2011) acredita na capacidade biofílica desses telhados, tanto no bem-estar físico como no mental dos indivíduos. Seus benefícios estão sumarizados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2– Benefícios da natureza

Benefícios		
Para o proprietário	Para a comunidade	Para o Ambiente
Amplia o tempo de vida da cobertura	Reduz o fluxo superficial de águas pluviais	Previne refluxo de drenagem
Reduz o consumo de ar condicionado durante o verão	Reduz o efeito de ilhas de calor nas cidades	Reduz o impacto do dióxido de carbono
Reduz o consumo de calefação durante o inverno	Reduz a inversão térmica	Remove o nitrogênio contido na água da chuva
Constitui ferramenta de gestão de águas pluviais	Reduz o ruído	Neutraliza o efeito da chuva ácida
Tem probabilidade de receber incentivos fiscais	Reduz a demanda de energia	Favorece a consolidação da biodiversidade urbana com pássaros e insetos.
Promove relações públicas	Melhora a qualidade do ar	
Aproveita área sem uso como espaço de jardim	Melhora a estética	

Fonte: Adaptado de ROLA, 2008.

Os tetos verdes têm o potencial de fornecer excelente isolamento acústico devido a sua grande massa, baixa rigidez e efeito de amortecimento. Através da superfície de absorção, reduz a pressão sonora em comunidades próximas a aeroportos, sistemas de transporte

elevados, industrial e em áreas urbanas (CONNELLY; HODGSON, 2008). De igual forma, Connelly (2011) e Van Renterghem e Botteldooren (2011) afirmam que esses sistemas reduzem os níveis de pressão sonora na paisagem urbana. Os benefícios acústicos desses telhados serão tratados com mais detalhes na seção 2.2.

Em contrapartida, o sistema possui algumas desvantagens, dentre elas: requer reforço estrutural devido à alta sobrecarga na estrutura nos sistemas intensivo e semi-intensivo, o que encarece a obra; possui alto custo inicial, mas que pode ser recuperado em longo prazo, já que proporciona uma economia de energia; sua camada impermeabilizante pode sofrer danos ocasionados pelo crescimento das raízes das plantas, podendo ser evitado com a utilização das camadas impermeabilizantes antirraízes; requer manutenção periódica, cuja frequência é maior para as coberturas intensivas.

2.1.4 Políticas públicas de incentivo

2.1.4.1 Internacionais

A preocupação mundial com o meio ambiente fez com que alguns governos mundiais aderissem às práticas sustentáveis e uma das medidas foi a implantação de telhados verdes. Como exemplo, na cidade de Toronto no Canadá, foi criado o Estatuto do Telhado Verde (*Green Roof Bylaw*) adotado em 2009, o qual obriga a implantação de telhados verdes sobre o desenvolvimento comercial, institucional e residencial novo, com uma área bruta mínima de 2.000 m². Em Toronto, vigora a Norma de Construção de Telhados Verdes e, além dela, o Programa de Incentivo Ecotelhado, que incentiva seu uso em edificações com área bruta inferior a 2.000 m², com o intuito de reduzir as emissões e gases do efeito estufa em até 80% até 2050 (TORONTO, 2009).

Há também no Canadá um manual para a elaboração de leis municipais que incentivem a construção telhados verdes, o Manual de Recursos para Formuladores de Políticas Municipais - "*Resource Manual for Municipal Policy Makers*", onde são apresentados em detalhe estudos de caso de 12 municípios pelo mundo, que possuem programas públicos de incentivo: Montreal, Toronto, Vancouver, Waterloo, Nova Iorque, Portland, Chicago, Basileia, Munster, Stuttgart, Cingapura e Tóquio.

Montreal exige que todos os edifícios novos possuam telhados verdes. Além disso, nos objetivos do Plano Diretor de Montreal, há incentivo para o uso desses telhados, além de um programa de incentivo direto, oferecido pela Eficiência Energética Quebec (LAWLOR *et al*, 2006). Existem cidades que obrigam o uso dos telhados vegetados - na quantidade mínima de 70% - nos edifícios públicos, e que oferecem aos desenvolvedores bônus, quando implementam práticas sustentáveis, como acontece em Portland, nos Estados Unidos. Há bônus para projetos de construções que possuam no mínimo 50% de telhados vegetados ou nas edificações maiores que 2.000m² como existe em Chicago (TORONTO, 2005).

A Europa é um exemplo em políticas de incentivos a telhados verdes. De acordo com Toronto (2005), em Basileia-Suíça, há a promoção de utilização de coberturas verdes através de inúmeras políticas. Foram concedidos subsídios financeiros para a colocação de telhados verdes nos anos 90; em 1996, através da utilização de 85.000m² de telhados verdes, foi gerada uma economia de energia de 4 GW/ano; em 2002, os regulamentos de construção estipularam que todos os telhados planos devem ser verdes. Já em Munster, na Alemanha, o contribuinte ganha um desconto de 80% na taxa de águas pluviais. Em Stuttgart, desde 1986, há incentivo financeiro à implantação de coberturas verdes para bancar 50% de seus custos.

Segundo Van Renterghem e Botteldooren (2008), na Alemanha, cerca de 10% de todos os telhados planos são verdes. Em Flandres, na Bélgica, a maioria dos governos locais incentiva a construção desses telhados. Segundo o Site Greenroofs, em Copenhage, na Dinamarca, é obrigatório que todas as novas coberturas planas ou com inclinação menor que 30 graus tenham de ser de vegetação. Em Cingapura, há esforços contínuos para torná-la uma “cidade jardim”. Já em Tóquio, no Japão, existem medidas de promoção que obrigam edificações novas maiores que 1000m² (particular) e 250m² (públicas) a utilizarem, no mínimo, 20% de teto verde (LAWLOR *et al*, 2006). Diante desse uso, a Associação Internacional de Telhados Verdes (doravante IGRA) defende e busca difundir os benefícios da utilização desses telhados (IGRA, 2012).

2.1.4.2 Brasileiras

As políticas públicas para práticas sustentáveis no Brasil são pouco audaciosas e muitas vezes inexistentes, destacando-se o IPTU verde, aos quais muitos municípios já

aderiram⁶. De acordo com Associação Telhado Verde Brasil (2011), o IPTU Verde é um incentivo fiscal, através do qual o contribuinte que fizer prática sustentável em seus imóveis, receberá desconto no Imposto Predial Territorial Urbano (IPTU). Essas práticas variam em cada município, mas no geral são: árvores plantadas, energia solar, utilização de materiais construtivos sustentáveis, sistema de captação de água pluvial, reuso de água e utilização de telhado verde.

A pioneira desse tipo de iniciativa no Brasil foi a cidade de São Carlos, em São Paulo (ATV BRASIL, 2011), e posteriormente Guarulhos, a partir da Lei Municipal 6.793/2010 (COLETIVO VERDE, 2012). O contribuinte pode receber descontos no IPTU de até 40% em Araraquara (ARARAQUARA, 2009), 50% em Vila Velha (VILA VELHA, 2009) e 100% em Curitiba (CURITIBA, 2000).

Há uma dificuldade em encontrar no Brasil legislações específicas sobre o uso de telhados verdes. O que se tem são apenas Projetos de Lei como, por exemplo, o Projeto de Lei nº 115/2009 da Câmara de Vereadores de São Paulo, que dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação de telhados verdes em determinados locais; o Projeto de Lei nº 1562/11 “que Altera a Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001, para estabelecer diretriz quanto à adoção de tecnologias construtivas ambientalmente adequadas” (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2011a); o Projeto de Lei 1703/11, que torna obrigatório aos condomínios verticais com mais de três unidades agrupadas a instalarem telhados vegetados em suas coberturas (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2011b); o Projeto de Lei nº 005.00006.2013 da Câmara de Vereadores de Curitiba, que visa tornar obrigatória a construção desses telhados nas edificações com três ou mais unidades agrupadas verticalmente. Os Estados de Santa Catarina e Rio de Janeiro são os que possuem uma lei de fato, a Lei nº 14.243/2007, que dispõe “sobre a implementação de sistemas de naturação através da criação de telhados verdes em espaços urbanos de Santa Catarina” (SANTA CATARINA, 2007), e a Lei 6349/2012 que dispõe sobre a obrigatoriedade de instalação de telhados verdes no Estado do Rio de Janeiro.

Diante disto, percebe-se que há pouco incentivo para a construção de telhados verdes no Brasil, apesar de todas as vantagens que apresentam. Todavia, existem organizações não governamentais como a Associação Telhado Verde Brasil (ATV Brasil) e a *Green Building Council Brasil* (doravante GBC Brasil). Esta última tem como objetivo incentivar construções

⁶ Araraquara-SP, São Vicente-SP, São Bernardo do Campo-SP, São Carlos-SP, Baciaína-SP, Venda Nova Imigrante-ES, Curitiba-PR, Brasília-DF, e muitos outros.

sustentáveis e promover processos de certificação, em especial a LEED⁷ no Brasil (GBC BRASIL, 2012).

2.2 Telhados verdes e controle de ruído

2.2.1 Ruído Urbano

O ruído urbano é um grave problema da sociedade atual. Ele vem afetando diretamente a qualidade de vida das pessoas em virtude das inúmeras tecnologias desenvolvidas e do crescimento não planejado das cidades.

O ruído é muitas vezes definido como “som indesejável” ou “som alto, desagradável ou Inesperado”. As suas origens encontram-se nas actividades humanas e estão principalmente ligadas ao processo de urbanização e ao desenvolvimento dos transportes e da indústria. Apesar de se tratar fundamentalmente de um problema urbano, pode também, em função das condições topográficas, ser uma fonte de incómodo em zonas rurais (LIVRO VERDE DA COMISSÃO EUROPEIA, 1996, p.3)

A faixa de frequência onde há sensações auditivas varia. Para um indivíduo jovem, abrange 10 oitavas de aproximadamente 20 Hz a 20 kHz (LAGSTRÖM, 2004; LONG, 2006). Dessa forma, a reação dos indivíduos ao ruído depende de fatores como audibilidade, características espectrais, hora de ocorrência e duração (BISTAFA, 2006). Conforme Paul (2010), ruído é um conceito psicológico e subjetivo, ou seja, a indesejabilidade ou desagradabilidade depende do indivíduo. De mesma forma, “a caracterização do ruído é, portanto, dependente de uma avaliação subjetiva de que o som é percebido como agradável ou desagradável” (ANDERSSON, 1998, p. 11 *apud* LAGSTRÖM, 2004, p. 12)⁸.

Paixão ([2002], p.1) escreve que, a despeito da evolução tecnológica, “o homem continua como o principal agente na geração da contaminação ruidosa, seja pela necessidade de máquinas e equipamentos, ou simplesmente por aspectos culturais e desinformação”. A geração de ruído afeta a saúde das pessoas, causando problemas ao funcionamento do sistema auditivo e provocando irritação, distúrbios do sono, estresse, doenças cardiovasculares,

⁷ *Leadership in Energy and Environmental Design*

⁸ Tradução nossa para: ... “*the characterisation of noise is therefore dependant on a subjective evaluation of whether the sound is perceived as pleasant or unpleasant*”

elevação da pressão arterial, entre outros (WHO, 2004). Além disso, o ruído, de acordo com Bistafa (2006, p.111), “incomoda as pessoas individualmente ao interferir na concentração, na conversação, no lazer, no sono e nas demais atividades do cotidiano”.

Por conseguinte, se há exposição frequente a altos níveis de pressão sonora, existe probabilidade de ocorrerem alterações hormonais, estreitamento de vasos sanguíneos e taquicardia, alteração na visão, distúrbios gastrointestinais, diminuição dos níveis de desempenho, sonolência, falta de concentração. Também pode ocorrer ansiedade, estresse emocional, nervosismo, dores de cabeça, impotência sexual, alterações no humor, aumento de transtornos psiquiátricos, entre outros (WHO, 1999). Lagström (2004) afirma que a exposição ao ruído traz dano à audição e provoca cansaço e diminuição da capacidade de raciocínio. O barulho também pode afetar a circulação sanguínea e agravar os sintomas de estresse. O ruído pode também causar problemas econômicos através da diminuição da produtividade profissional, bem como diminuição dos valores de propriedade, devido à menor demanda (KINSLER et. al, 1980; KANG, 2006).

Em decorrência do “[...] crescente número de políticas ambientais que se baseiam na correlação evidente entre ruído e muitos problemas de saúde, tem-se buscado níveis sonoros cada vez mais baixos, principalmente aqueles provenientes dos equipamentos de uso doméstico” (SILVA, 2004, p. xi).

O ruído ambiental é aquele fornecido a partir das fontes: ruído rodoviário, ferroviário, aeronáutico, de construção, de trânsito e de vizinhança (WHO, 1999). Nos países da União Europeia, aproximadamente 40% (quarenta por cento) da população está exposta ao ruído de tráfego com níveis de pressão sonora equivalentes diários superiores a 55 dB (A).

Segundo publicação da Comissão das Comunidades Europeias, “Futura Política de Ruído – Livro Verde da Comissão Europeia” (1996) existem três abordagens fundamentais para a redução da exposição ao ruído ambiental. A primeira solução é a redução de ruído na fonte “proveniente de máquinas, de motores, do contato entre os pneus e a superfície, reduzindo as velocidades, o volume de tráfego e a utilização de equipamentos” (p.7). A segunda é a redução no caminho de propagação, “limitação da transmissão do ruído através da colocação de barreiras entre as fontes e as pessoas afetadas” (p.8). A última é a “redução do ruído no ponto de recepção” (p.8). O telhado verde se enquadra na medida mitigadora dentro do segundo item, ou seja, no caminho da propagação.

Segundo Kinsler et al. (1980), as principais razões para a diminuição do ruído é evitar danos diretos à audição, mas também ampliar o conforto ao dormir, trabalhar e socializar.

2.2.2 Legislação de controle de ruído externo urbano

No Brasil ainda há poucas legislações sobre ruído urbano. Uma delas é a Resolução 01 (CONAMA, 1990) - Controle da Poluição Sonora – que dispõe “sobre critérios de padrões de emissão de ruídos decorrentes de quaisquer atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, inclusive as de propaganda política”. De acordo com a Resolução são prejudiciais à saúde e ao sossego público os “ruídos com níveis superiores” aos considerados aceitáveis pela NBR 10.151(Anexo B).

A NBR 10151 (ABNT, 2000) – Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas Visando ao Conforto da Comunidade – é utilizada para a elaboração de legislação referente ao uso e ocupação do solo e ao ruído nas cidades brasileiras. Ela determina os horários limites dos períodos noturno e diurno, das 22 horas até às 7 horas da manhã respectivamente, entre outras. De acordo com a NBR 10151, “o critério básico de ruído externo para áreas residenciais deve ser de 45 dB (A)”, e seus níveis de critério podem ser obtidos a partir de um valor básico por meio de correções para a hora do dia e por diferentes tipos de zonas, sendo no noturno adicionado o valor de -5.

2.2.3 Contexto de uso de telhados verdes em controle do ruído urbano

Apenas recentemente a investigação científica foi conduzida para os efeitos acústicos dos telhados verdes. Fundamentalmente, a energia sonora pode ser reduzida por um telhado verde de duas formas: ou fornecendo isolamento maior do sistema de telhado ou absorvendo ondas sonoras que se propagam sobre o telhado (VAN RENTERGHEM; BOTTELDOOREN, 2011).

Na pesquisa de Van Renterghem e Botteldooren (2008), os telhados verdes possuem efeitos positivos principalmente nas bandas de oitava com frequências centrais em 500 e 1000 Hz. Também se observou uma boa eficiência perto da espessura máxima da camada entre 15 e 20 cm para esse tipo de telhado. No entanto, em telhados intensivos, onde a espessura da camada de substrato geralmente é superior a 20 cm, os efeitos positivos de absorção sonora não são mais influenciados pela espessura do substrato.

Van Renterghem e Botteldooren (2009), em outro estudo, averiguaram a influência de um telhado verde na redução de ruído do tráfego rodoviário na pressão sonora nas fachadas das edificações, e verificaram que ele pode, através da absorção sonora, trazer reduções significativas, dependendo de sua área. Se o tráfego está com velocidade alta, o efeito do teto verde aumenta para veículos leves; já se forem veículos pesados, o efeito não é tão grande, devido à dominância na faixa de baixas frequências, pelo ruído do motor, que está localizado numa posição mais elevada, resultando em uma zona de sombra acústica menor ao longo da fachada.

Por conseguinte, o efeito deste telhado em edificações próximas a rodovias onde transitam veículos pesados é pequeno, pois com velocidade menor que 30 km / h e maior que 130 km / h apresenta uma diferença no entorno delas de apenas 1 e 2 dB respectivamente. Porém, para veículos leves, a diferença equivale até 4 dB. Um teto verde extensivo de apenas 5 cm de espessura já é suficiente para reduzir significativamente o ruído de veículos leves.

Neste mesmo estudo os autores idealizaram diferentes configurações de inclinação de telhados, tanto convencionais como vegetados e observaram, em uma rua inclinada, que um telhado plano geralmente resulta na melhor redução de nível de pressão sonora no entorno.

Em outro estudo, Van Renterghem e Botteldooren (2011) experimentaram cinco casos diferentes de medições com e sem teto vegetado, com o intuito de mostrar o que pode ser esperado da prática atual de telhados verdes na Bélgica. As medições procederam no lado de fora das edificações com a verificação do nível de pressão sonora em 1/3 de oitava por um período de tempo de dois minutos com lançamentos de cinco tiros, ou seja, por um sinal impulsivo. Eles observaram que telhados verdes podem reduzir o nível de pressão sonora em locais onde as ondas sonoras são difratadas. Perceberam que esses telhados obtiveram uma redução do nível de pressão sonora superior a 10 dB entre as frequências de 400 Hz e 1250 Hz no caso de uma simples difração e que o substrato com camada de 18 cm de espessura era o responsável nos valores obtidos. Já para os casos de duplas difrações, no caso da propagação sonora, por exemplo, sobre um edifício retangular, a redução é menos dependente da frequência.

Outra pesquisa (YANG; CHOI; KANG, 2010) foi realizada a partir de três diferentes condições de substratos e indicou que os efeitos da profundidade e do tipo de substrato são relativamente menores que as configurações gerais do sistema. Se as alturas das estruturas perfiladas forem diferentes, como aproximadamente de 6 a 12 cm, a redução de ruído é cerca de 5 a 10 dB em diferentes frequências e padrões irregulares.

Em recente estudo (YANG; KANG; CHOI, 2012), foram realizadas medições para examinar os efeitos acústicos de sistemas de telhado verde sobre uma estrutura subsolo ao perfil da rua, e posteriormente foram feitas simulações numéricas. A pesquisa partiu de cinco parâmetros experimentais: estrutura de telhado vazia (no caso bandejas de plásticos), área de telhado verde, profundidade e tipo de substrato, posição do sistema de telhado verde e tipos de vegetação. Os resultados indicam que a atenuação do nível de pressão sonora aumenta gradualmente quando aumentado o número de bandejas de telhado verde, embora existam variações devido ao efeito geométrico. Para os substratos, se forem iguais há um aumento na absorção, porém se forem com propriedades diferentes, os efeitos são relativamente pequenos em relação aos outros parâmetros. A Figura 2.9 ilustra a diferença das espessuras de substratos da empresa Zinco (Europa) de 5 e 10 cm, com a de calcário com camada de 10 cm.

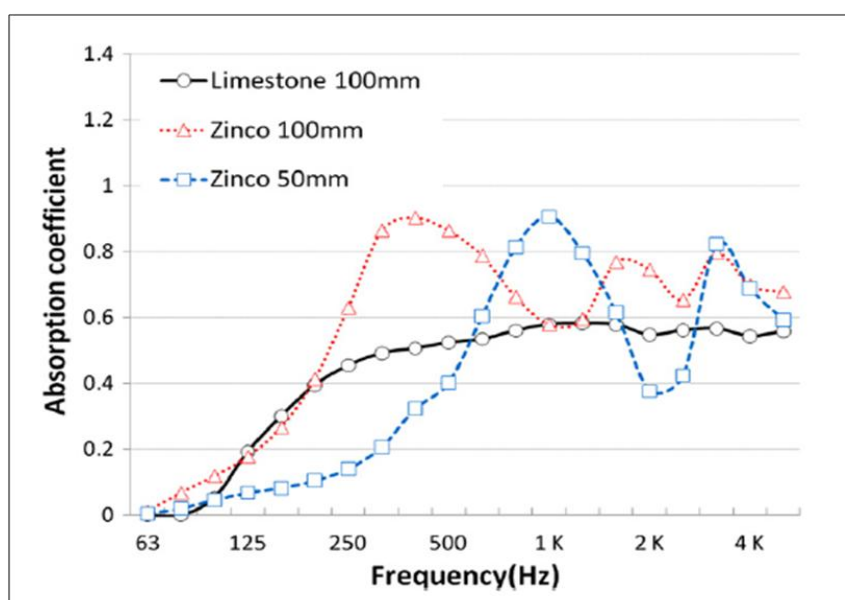


Figura 2.9 – Incidência normal do coeficiente de absorção sonora de substratos em condição seca.
Fonte: Yang; Kang; Choi, 2012, p. 46.

Em relação à posição do sistema do telhado, este interfere na atenuação em faixas de frequência diferenciadas. Quanto aos tipos de vegetação, verificaram-se efeitos positivos acima de 4 kHz e em aproximadamente 4 dB se a camada de vegetação for melhor formulada.

2.2.4 Absorção sonora

2.2.4.1 Definição

A absorção sonora é um fator muito importante no controle acústico de um recinto. Segundo Long (2006), na absorção sonora, uma parte da energia acústica contida na onda incidente é refletida, outra é transmitida através do material, mas a maior parte é absorvida no interior do mesmo (Figura 2.10).

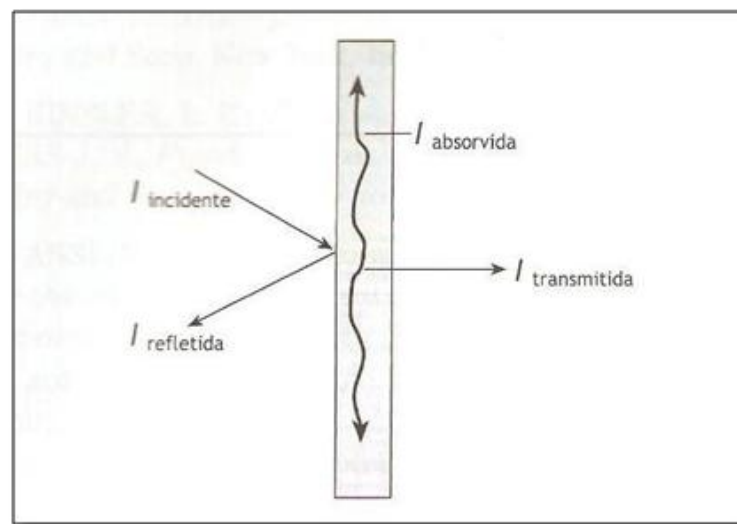


Figura 2.10- Balanço energético do som que incide sobre uma superfície
Fonte: Bistafa, 2006, p.232.

De acordo com Bistafa (2006), os materiais usualmente utilizados para absorção sonora são os fibrosos ou porosos. Nesses materiais a absorção acontece devido à dissipação de energia acústica por atrito em função do movimento das moléculas de ar no interior do material.

2.2.4.2 Coeficiente de Absorção sonora

O parâmetro que determina as características de absorção sonora de um material é o coeficiente de absorção sonora (α), que é definido como sendo a razão da energia acústica absorvida pela incidente, conforme (BISTAFA, 2006) para o qual: $I_{\text{absorvida}}$ é a intensidade

sonora, ou seja, a quantidade de energia absorvida por unidade de tempo e unidade de área; e I incidente, a intensidade sonora do som incidente.

$$\alpha = \frac{I_{\text{absorvida}}}{I_{\text{incidente}}} \quad (2.1)$$

Para realizar a medição do coeficiente de absorção sonora, há dois métodos principais: o método da câmara reverberante e o do tubo de impedância (KANG, 2006). Porém o método do tempo de reverberação (LONG, 2006) é utilizado por ser mais simples e mais consistente para medir a absorção.

Uma característica comum a quase todos os materiais absorvedores de som é que eles são porosos. Ou seja, há fluxo de ar através do material, como resultado de uma diferença de pressão entre os dois lados do material.

As características de absorção de um material poroso são dependentes de um número de variáveis, incluindo a sua espessura, densidade, porosidade, resistência e orientação das fibras de fluxo. Como exemplo, Bistafa (2006) ilustra nas Tabelas 2.3 e 2.4 valores de coeficientes de absorção de materiais em diferentes faixas de frequência.

Tabela 2.3- Coeficientes de absorção sonora de materiais porosos e fibrosos

Material				Frequência central da banda de oitava (Hz)						NRC		
				125	250	500	1000	2000	4000			
Fibroso	Isover – Santa Marina Placa de lã de vidro aglomerado.	Densidade (Kg/m ³)	30	Espessura (mm)	25	0,08	0,27	0,50	0,87	0,98	1,04	0,66
			60		50	0,17	0,62	0,90	1,08	1,07	0,97	0,92
		Densidade (Kg/m ³)	64	Espessura (mm)	25	0,05	0,27	0,68	0,94	1,03	1,05	0,73
					50	0,13	0,75	0,96	1,03	0,88	0,96	0,91
	Thermax – RockFibras Manta de lã de rocha basáltica.	Densidade (Kg/m ³)	32	Espessura (mm)	50	0,35	0,48	0,74	0,88	0,91	0,96	0,75
					100	0,85	0,98	1,10	1,11	1,09	1,18	1,07
		Densidade (Kg/m ³)	64	Espessura (mm)	50	0,50	0,59	0,91	1,05	1,06	1,06	0,90
					100	0,87	1,23	1,19	1,15	1,12	1,10	1,17
Poroso	Espumex - Acústica São Luiz Espuma flexível de poliuretano poliéster incombustível			Espessura (mm)	40	0,06	0,19	0,38	0,52	0,48	0,65	0,39
					60	0,10	0,28	0,49	0,53	0,47	0,82	0,44
					70	0,15	0,42	0,75	0,74	0,66	0,95	0,64
					75	0,15	0,50	0,90	0,99	1,00	1,00	0,85
	Sonex – Illbruck Espuma flexível de poliuretano poliéster (com retardadores de chama) Densidade: 32 kg/m ³			Espessura (mm)	20	0,04	0,12	0,28	0,44	0,60	0,73	0,36
					35	0,06	0,20	0,45	0,71	0,95	0,89	0,58
					50	0,07	0,32	0,72	0,88	0,97	1,01	0,72
					75	0,13	0,53	0,90	1,07	1,07	1,00	0,89

Fonte: Adaptado de Bistafa, 2006.

Tabela 2.4- Coeficientes de absorção sonora de materiais e de revestimentos de superfícies

Material	Frequência central da banda de oitava (Hz)					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Alvenaria de tijolos aparentes não-pintados	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Alvenaria de tijolos aparentes pintados	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Reboco liso sobre alvenaria de tijolos ou blocos	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
Alvenaria de blocos aparentes pintados	0,01	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Reboco ou gesso rústico sobre quaisquer alvenarias	0,02	0,03	0,04	0,05	0,04	0,03
Reboco ou gesso desempenado sobre quaisquer alvenarias	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
Concreto ou cimento liso desempenado	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Concreto aparente, tratado e polido	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Azulejos ou pastilhas	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Mármore, cerâmica ou granito polido	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Painel de cortiça sobre qualquer alvenaria	0,05	0,05	0,05	0,08	0,10	0,13
Assoalho em tábuas corridas, com espaço livre até o contrapiso	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Tacos de madeira colados sobre contrapiso	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Carpete tipo forração simples, colado sobre contrapiso	0,05	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40
Carpete tipo forração alto-tráfego	0,05	0,10	0,15	0,30	0,50	0,55
Carpete de náilon 6mm sobre manta de feltro	0,05	0,10	0,10	0,30	0,40	0,50
Carpete de náilon de 10mm sobre manta de feltro	0,05	0,15	0,30	0,40	0,50	0,60
Carpete tipo forração simples, colado sobre contrapiso	0,05	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40
Paviflex ou plurigoma, colado sobre contrapiso desempenado	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Cortina de tecido leve, esticada, em contato com a parede	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Cortina de tecido médio, drapeada, em 50% da área	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
Cortina de tecido pesado, drapeada, em 50% da área	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Superfície de água (piscinas, espelhos d'água, etc.)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Vidro fixo, temperado ou laminado, com grande superfície	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Vidro comum montado em caixilho	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Divisória de gesso tipo dry-wall com ou sem enchimento	0,10	0,08	0,05	0,03	0,03	0,03
Divisória de lambris de madeira compensada	0,58	0,22	0,07	0,04	0,03	0,07
Lambris tipo macho-fêmea, contra a parede	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10
Forro de gesso acartonado com ou sem enchimento	0,10	0,08	0,05	0,03	0,03	0,03
Assoalho em tábuas corridas sobre contrapiso	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Porta de madeira comum, pintada ou envernizada	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10
Porta acústica, com faces de madeira, pintadas ou envernizadas	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07

Fonte: Adaptado de Bistafa, 2006.

Tipicamente, a absorção de um material poroso é grande a altas frequências e o desempenho a baixas frequências depende principalmente da espessura e a resistência do fluxo (KANG, 2006). O valor do coeficiente de absorção depende principalmente da frequência do som incidente, e também da tortuosidade.

O valor do coeficiente de absorção, segundo Long (2006), também depende do ângulo de incidência do som; este, à medida que aumenta, amplia a profundidade aparente do material, e conseqüentemente, eleva a absorção. Em ângulos de incidência muito grandes não há mais uma componente de velocidade no interior do material de modo que o coeficiente rapidamente diminui.

Beranek (1962) exemplifica que, quanto maior a espessura de determinado material absorvente, maior será a absorção nas baixas frequências. Segundo Kang (2006), o coeficiente de absorção sonora, α , varia entre 0 e 1. Dessa forma, um material que possui um coeficiente de absorção sonora igual a 0,10 absorve 10% da energia incidente.

Sabine⁹ foi quem desenvolveu a teoria da absorção sonora dos materiais e do tempo de reverberação. Conforme Long (2006), Sabine relacionou o decaimento do som em recintos fechados com a equação para o tempo de decaimento nesses recintos e descobriu que o tempo de reverberação de um recinto era inversamente proporcional à quantidade de absorção do mesmo.

2.2.4.3 Tempo de Reverberação

O Tempo de Reverberação é o parâmetro mais importante que descreve a qualidade acústica de uma sala ou espaço. O mesmo varia em função do volume do recinto e do grau de absorção das superfícies em seu interior expostas a fonte sonora.

O tempo de reverberação pode ser definido de duas formas: física e matematicamente. Fisicamente, T₆₀ é o tempo (em segundos) que o som (nível de pressão sonora) demora para cair 60 dB após o desligamento da fonte sonora. Matematicamente, pode ser expresso através da equação de Sabine, o T₆₀, que é inversamente proporcional à absorção dos materiais de uma sala, e é representado por (LONG, 2006):

$$T_{60} = 0,161 \frac{V}{A} \quad (2.2)$$

Sendo: T₆₀ o tempo de reverberação em segundos; V o volume da sala em m³; A, a área total de absorção na sala, em m², onde $A = S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 + S_3 \alpha_3 \dots + S_n \alpha_n$; S sendo a área de cada material absorvente no interior da câmara ou sala; α , o coeficiente de absorção sonora de cada material.

Na prática, devido ao nível de ruído de fundo que existe usualmente nas salas, não é fácil medir um decaimento de 60 dB, a menos que seja emitido um ruído muito intenso.

⁹ Wallace Clement Sabine, 1868-1919 é considerado o Pai da acústica arquitetônica moderna, por seu pioneirismo no método de acústica em recintos. Sabine foi professor de física na Universidade de Harvard, nos Estados Unidos (BISTAFA, 2006).

Assim, torna-se mais funcional calcular um decaimento de 30 dB ou até mesmo 20 dB e extrapolar para os 60 dB, ou seja, a partir do T30 e T20. Essa extrapolação é viável à medida que, num meio totalmente difuso, o decaimento é linear e assim as medidas de T60, T30 e T20 serão equivalentes (Figura 2.11).

T30 é o tempo, em segundos, para que a energia sonora decaia de 30 dB após o desligamento da fonte (5 a 35 dB excepcionalmente); T20 é o tempo em segundos, para que a energia sonora decaia de 20 dB (5 a 25 dB, excepcionalmente).

Os tempos de reverberação podem ser nomeados EDT, T20 e T30, respectivamente, para as três faixas de avaliação. O tempo de decaimento inicial (EDT) é o tempo, em segundos, para que a energia sonora decaia 10 dB. É usado apenas em acústica de salas, enquanto que T20 e T30 podem ser usados para acústica de edifícios, potência sonora, e medições de coeficiente de absorção (BRÜEL & KJAER, 2012).

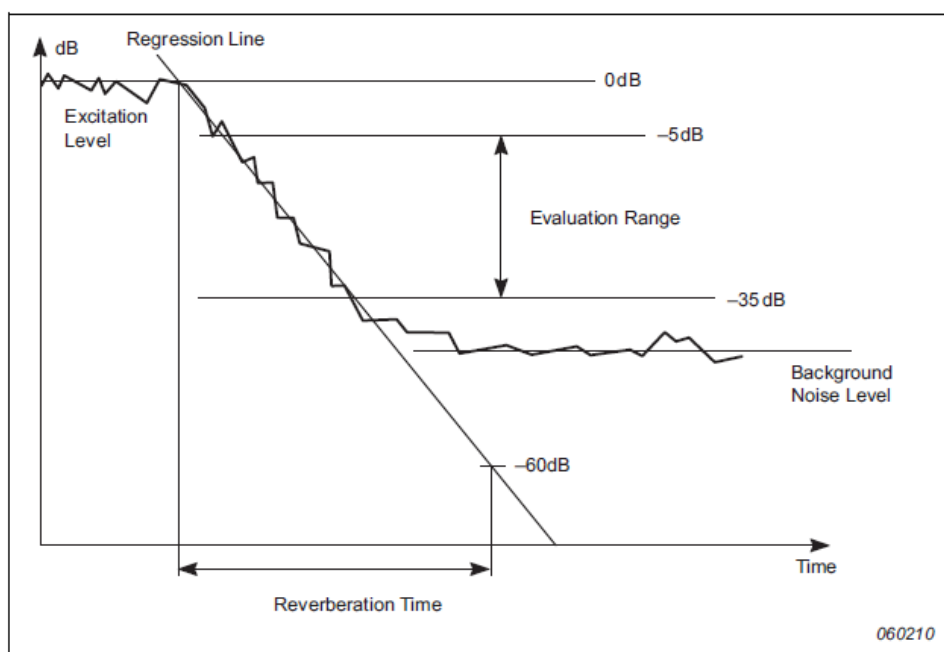


Figura 2.11– Definição do tempo de reverberação. Faixa de avaliação de 30 dB para o cálculo do T30 indicado
Fonte: BRÜEL & KJAER, 2012, p.148.

O tempo de reverberação numa sala reverberante, pela ISO 354, pode ser medido em bandas de frequência de oitava ou 1/3 de oitava, e pode ser utilizado para sua medição o Método de Ruído Interrompido, com o gerador de ruído, ou o Método de Resposta Impulsiva, como o de uma pistola ou explosão de balão.

O Método do Ruído Interrompido consiste em excitar a sala com um ruído de banda larga por um tempo suficiente para que a pressão sonora seja constante na sala, e logo a fonte seja desligada (interrompida) e o decaimento gravado por um computador. O ruído rosa é normalmente usado nesse método (BRÜEL & KJAER, 2012). Já no Método da Resposta Impulsiva, a fonte sonora é excitada com um ruído pseudoaleatório, e nesse método o TR é encontrado pela transformada inversa de Fourier da função de transferência entre a pressão em cada microfone e o ruído de excitação que fornece a resposta impulsiva.

2.2.4.4 Coeficiente de redução sonora

De acordo com Bistafa (2006) e Long (2006), o coeficiente de redução sonora (NRC) nada mais é que a média aritmética dos coeficientes de absorção sonora das bandas de oitava entre 250 Hz a 2 KHz, arredondando para o mais próximo de 0,05 do material, sendo de grande utilidade numa primeira análise comparativa. Bistafa (2006) apresenta a seguinte equação:

$$NRC = \frac{1}{4} [\alpha (250 \text{ Hz}) + \alpha (500 \text{ Hz}) + \alpha (1.000 \text{ Hz}) + \alpha (2.000 \text{ Hz})] \quad (2.3)$$

O NRC corresponde a um único número para descrever as características de absorção de um material, sendo que seus valores são para fins de referência gerais apenas. No geral, materiais com valores menores ao NRC de 0,20 são considerados de reflexão, enquanto aqueles com valores superiores ao NRC de 0,40 são considerados de absorção.

2.2.4.5 Coeficiente de absorção de telhados com vegetação

Telhados vegetados possuem coeficientes de absorção significativos. Segundo Connelly (2011), essa afirmação faz parte dos principais resultados da medição de uma faixa de substratos desses telhados que inclui a determinação de sua absorção sonora em termos de

NRC. A autora também confirma que a obtenção das características acusticamente relevantes e as propriedades do substrato têm impacto significativo sobre a absorção, seja por porosidade, teor de matéria orgânica ou umidade.

Para Smyrnova et al (2010), nas amostras vegetadas testadas, o coeficiente de absorção é geralmente acima de 0,5 nas frequências médias e altas, sendo muito eficaz no controle de ruído urbano. Para ele a absorção ocorre tanto no substrato como nas plantas. Wong et al (2010) acreditam na possibilidade da queda no tempo de reverberação nas menores frequências principalmente devido à absorção pelo solo, enquanto que a gama de frequências de 500Hz a 1.600Hz é devido à absorção pelas plantas.

Os substratos dos telhados verdes possuem propriedades interessantes na absorção sonora por serem altamente porosos e permitirem que as ondas acústicas entrem no meio deles (VAN RENTERGHEM; BOTTELDOOREN, 2011).

A pesquisa de Connelly (2011) averiguou os constituintes da mistura do substrato com areia, pedra-pomes e orgânicos (húmus) e concluiu que substratos com maior porcentagem de matéria orgânica possuem maior absorção sonora.

Comunidades vegetais apresentam, de acordo com Linskens et al (1976), diferenças na absorção sonora devido a diferenças na folhagem, altura e massa. Para Connelly (2011), a densidade de plantas, área foliar da copa e estrutura da raiz afetam a porosidade e a absorção sonora.

Outro fator interessante a ser observado, segundo Horoshenkov e Mohamed (2006), é a presença de água nos materiais porosos. No caso de um telhado verde, se o substrato estiver molhado, a absorção sonora será menor. Os resultados da pesquisa de Connelly (2011) confirmam que a absorção sonora diminui com o teor de umidade e complementam que as propriedades de absorção do substrato reduzem se o mesmo estiver compactado.

Ainda segundo Connelly (2011), se houver aumento da quantidade de matéria orgânica por 12,5%, haverá aumento proporcional do coeficiente de absorção de 9%. À medida que o teor de umidade do substrato aumenta dentro da planta, a porcentagem de absorção sonora diminuirá até 26% e a compactação reduzirá a absorção em 10%.

Telhados verdes aumentam a absorção sonora da superfície do telhado, aumentam a perda de transmissão sonora e modificam a paisagem sonora urbana (CONNELLY, 2011).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa caracteriza-se como experimental e teórica de cunho quantitativo baseada nos resultados adquiridos através dos ensaios realizados em laboratório. A metodologia utilizada neste trabalho divide-se de acordo com os objetivos específicos já apresentados.

Neste capítulo é apresenta-se o tipo de materiais e métodos que foram utilizados nos experimentos, os módulos experimentais, o local de realização dos ensaios, o modo como foi calculado o coeficiente de absorção sonora do material estudo através do método pela câmara reverberante, os equipamentos utilizados e seu posicionamento de acordo com a normatização vigente.

3.1 Procedimentos Experimentais

Foram determinadas experimentalmente as características acústicas de dois tipos de sistemas modulares de telhados verdes em termos de coeficiente de absorção.

A determinação do coeficiente de absorção acústico foi regida pela norma ISO 354 (específica para medição da absorção sonora em uma sala reverberante), a partir da obtenção do tempo de reverberação pelo método de ruído interrompido, conduzida em câmara reverberante em campo acústico difuso, ou seja, a pressão sonora foi distribuída igualmente em todos os pontos do ambiente onde a medição foi realizada. O parâmetro acústico foi determinado em função da espessura do substrato e da morfologia da camada vegetal nela plantada.

3.1.1 Método de cálculo do coeficiente de absorção sonora pela câmara reverberante

A partir das medições das amostras em câmara reverberante em campo difuso, foi obtido o tempo de reverberação pela extrapolação do T20 e T30. Na pesquisa, as medições

foram elaboradas através de exigências da ISO 354, em bandas de 1/3 de oitava e calculadas na gama de frequências de 100 Hz a 5 kHz, abrangendo tanto baixas, como médias e altas frequências.

O Tempo de Reverberação varia de acordo com o posicionamento dos microfones em uma sala, por isso recomenda-se medir em várias posições, pois a média espacial para todas as posições proporciona uma avaliação global.

De acordo com a ISO 354, houve nas medições 12 “curvas de decaimento”. Como o modelo optado foi o Medidor de Nível de Pressão Sonora, o MNPS 2270, este em cada medição ocupou dois microfones, o que, segundo a norma supracitada, exigiu seis posições diferentes e alternadas para os ensaios.

Os ensaios consistiram na colocação da amostra do material no piso da câmara reverberante e na medição do tempo de reverberação com e sem a amostra. O princípio do ensaio foi calcular a média do tempo de reverberação na câmara reverberante. Assim eclodiu o cálculo da área de absorção sonora equivalente A_n , em m², sendo $n=1$ para a câmara reverberante vazia e $n=2$ para a câmara reverberante contendo a amostra de ensaio, obtida pela equação 3.1:

$$A_n = \frac{55,3 V}{c T_n} - 4V m_n \quad (3.1)$$

Onde: V - o volume da câmara reverberante, em metros cúbicos;

c - a velocidade de propagação do som no ar, em metros por segundo, em função da temperatura no momento da medição, calculada pela expressão:

$c = 331 + 0.6t$ (m/s), onde: t - é a temperatura do ar, em °C (para temperaturas que variam entre 15°C e 30°C);

T_n - Tempo de reverberação, em segundos;

m_n - coeficiente de atenuação de potência, em 1/m, calculado de acordo com a ISO 9613-1, usando as condições climáticas da câmara reverberante, sendo $m = \alpha / 10 \lg(e)$.

A partir desses tempos de reverberação, foi calculada a área equivalente de absorção sonora, usando-se a seguinte equação proposta pela ISO 354:

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,3V \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V (m_2 - m_1) \quad (3.2)$$

sendo: c_1 a velocidade de propagação do som no ar à temperatura T_1 ; c_2 a velocidade de propagação do som no ar à temperatura T_2 ; A_1 a área de absorção sonora equivalente na sala vazia; V o volume, em m^3 , da sala vazia; T_1 o tempo de reverberação, em segundos, da sala vazia; m_n o coeficiente de atenuação de potência, calculado de acordo com a ISO 9613-1, utilizando as condições climáticas na sala de reverberação vazia durante a medição; A_2 a área de absorção sonora equivalente na sala com amostra; T_2 o tempo de reverberação, em segundos, da sala com amostra; m_2 o coeficiente de atenuação de potência.

Pela ISO 354, o coeficiente de absorção sonora foi calculado a partir da equação 3.3:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (3.3)$$

sendo: A_T a área equivalente de absorção sonora da amostra, em metros quadrados; e S a área, em metros quadrados, da superfície da amostra de teste.

3.1.2 Local de realização dos ensaios

As medições foram realizadas na câmara reverberante do Laboratório de Engenharia Acústica, pertencente ao Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria.

A câmara reverberante possui área de $42,61m^2$ e volume de $207m^3$, dentro dos padrões da norma ISO 354, que prevê volume não inferior a $150m^3$ nem superior a $500m^3$, pois a precisão das medições pode ser afetada, em especial nas altas frequências, devido à significativa absorção sonora incrementada pelo ar. Indica-se que para a construção de novas câmaras volume deve ser superior a $200m^3$.

As paredes, teto e piso da câmara de estudo são formados de concreto armado na espessura de 30 cm, e a estrutura não está apoiada diretamente ao solo, mas apoiada em neoprene para isolá-la. Além disso, a câmara possui porta dupla em chapa de aço vedada com borracha em seu contorno, para torná-la totalmente estanque. Como se pode observar nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3 do LEAC da UFSM, não há paralelismo entre as suas superfícies para potencializar o campo difuso, ou seja, as paredes anguladas e elementos difusores tendem a tornar a pressão sonora mais uniforme no espaço e contribuir para a criação do campo difuso.

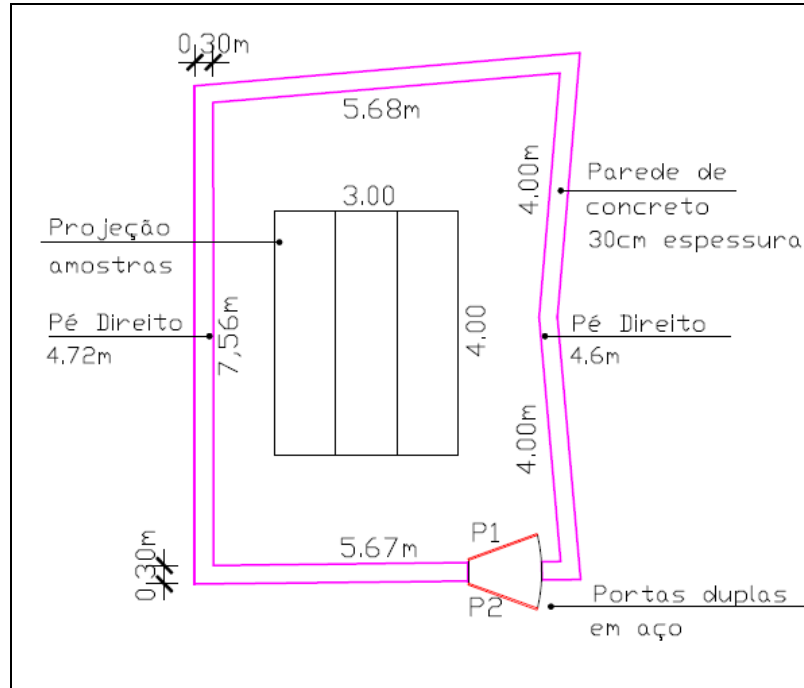


Figura 3.1– Esquema Planta Baixa Câmara Reverberante UFSM



Figura 3.2 – Esquema Perspectiva Câmara Reverberante UFSM

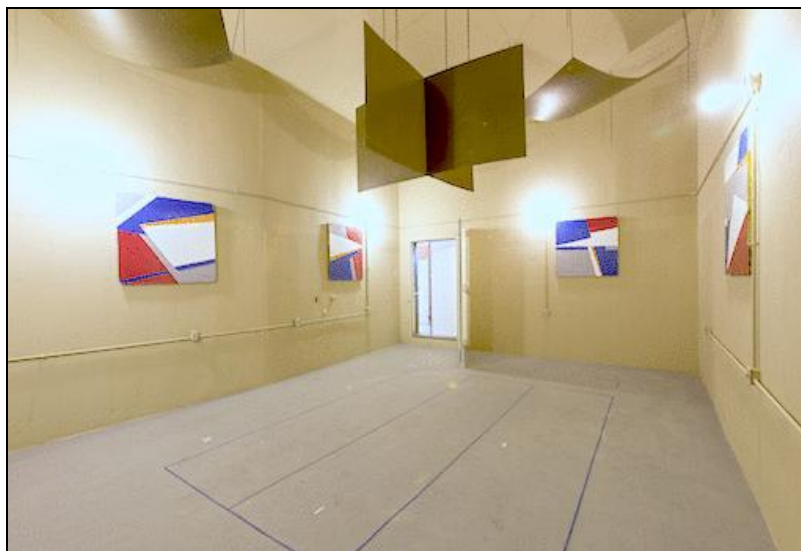


Figura 3.3– Vista Câmara Reverberante UFSM

Como a câmara reverberante possui alto volume, é necessário que a área da amostra de medição seja satisfatoriamente grande, a fim de que os tempos de reverberação medidos, com e sem a amostra na câmara, sejam satisfatoriamente diferentes para que a teoria estatística seja válida.

3.1.3 Equipamentos utilizados e seu posicionamento

Para geração e aquisição dos sinais, foi utilizado medidor de nível de pressão sonora Modelo 2270 da B & K, calibrador acústico tipo 4231, amplificador de potência fonte sonora, microfone de campo difuso 1/2" capacitivo e computador portátil, conforme Figura 3.4.

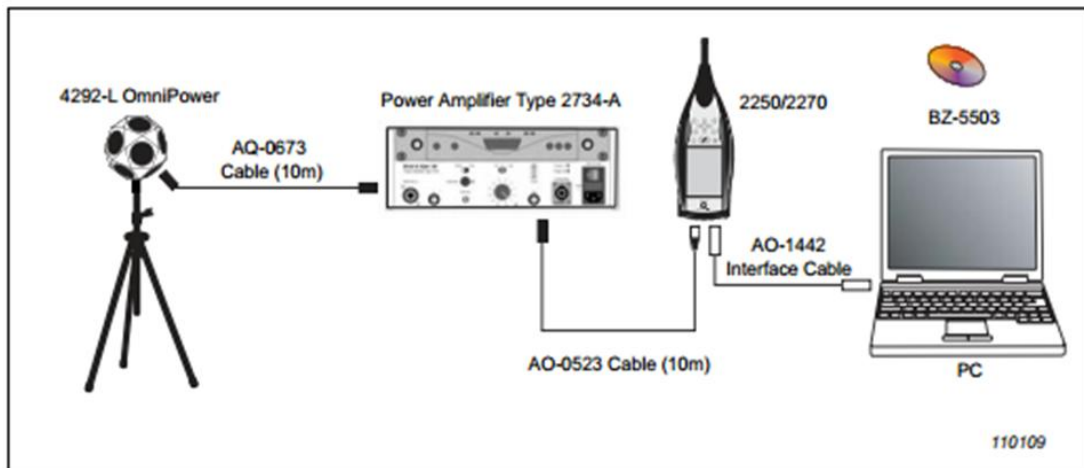


Figura 3.4– Esquema da medição do tempo de reverberação pelo Método de Ruído Interrompido
 Fonte: BRÜEL & KJAER, 2012, p.149.

De acordo com a norma ISO 354, os microfones devem ser omnidirecionais, calibrados e posicionados, de modo a apresentar um afastamento entre si de 1,5 m e de 2 m de qualquer fonte sonora e, no mínimo, 1 m das superfícies da câmara reverberante. Os microfones têm que estar dispostos em três posições diferentes, no mínimo. A fonte sonora também deve ser omnidirecional e possibilitar, pelo menos, duas posições, com um espaçamento mínimo de 3 metros. Desta forma, no mínimo 12 medições de TR são obtidas para o cálculo posterior da média espacial.

Para a realização do ensaio, foram escolhidas posições distintas para a fonte sonora (três) e para os microfones (quatro), como se pode observar na Figura 3.5, realizando-se então um total de seis medições em cada experimento.

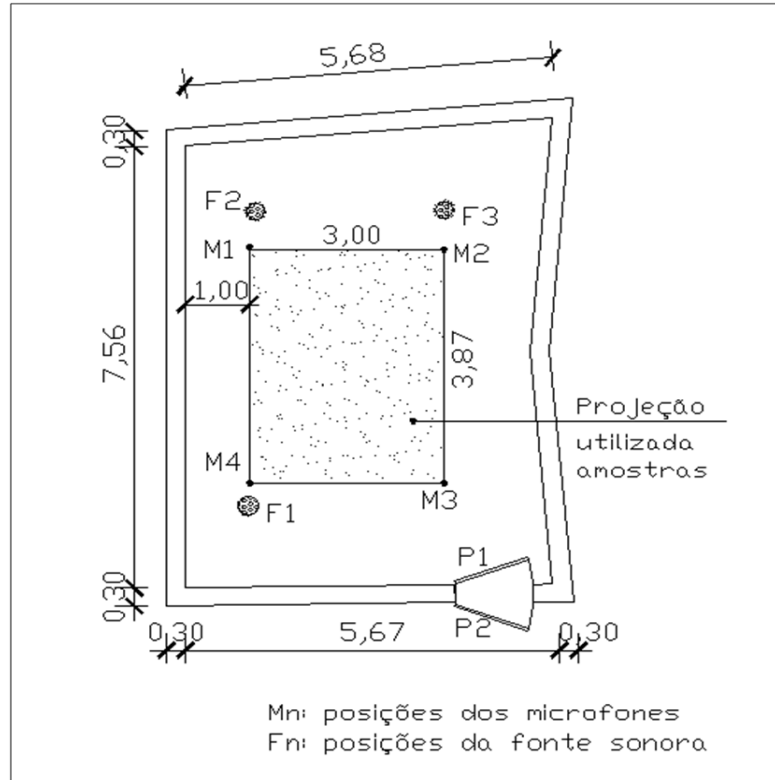


Figura 3.5– Esquemática do ensaio

Em suma, fizeram-se assim sete tipos de ensaios: o primeiro com a câmara reverberante vazia (sem amostra) e os restantes (do segundo ao sétimo) com amostras (experimentos 01 a 06).

3.1.3.1 Condições ambientais no interior da câmara reverberante

De acordo com a norma ISO 354, nas medições devem ser monitoradas as condições climáticas da câmara reverberante, tanto de temperatura quanto de umidade relativa. A umidade relativa deve estar entre 30 a 90%, e a temperatura mínima 15°C e constante durante todo o teste. O acompanhamento deve ser realizado através do *Higro-Thermometer*, que demonstra a temperatura em graus *Celsius* e a umidade, visto que mudanças de temperatura e umidade relativa no decorrer da medição podem ter efeitos significativos no tempo de reverberação.

3.1.4 Montagem do experimento

O sistema adotado para este experimento foi o modular da Ecotelhado. Por ser um sistema de fácil transporte e carga menor, optou-se pelos Sistemas hexa e alveolar simples, e foram definidas três situações de medições diferenciadas em cada sistema.

3.1.4.1 Módulos experimentais

A norma rege que as amostras de materiais a serem avaliados precisam ter área entre 10m² a 12m² em câmaras de 200m³, e para câmaras maiores a área deve ser multiplicada pelo fator de $(V/200m^3)^{2/3}$. Para tanto, a partir desse fator, optou-se pela metragem quadrada da amostra de 11,66m² nos dois sistemas.

Segundo a norma ISO 354, a média do tempo de reverberação deve ser medida com e sem amostra. Primeiramente, as medições foram realizadas com a sala vazia e posteriormente com as situações apresentadas na Tabela 3.1, ou seja, com placas do sistema com substrato e placas do sistema com vegetação (*sedum* e grama).

O substrato escolhido foi o mesmo nos experimentos, composto de areia, cascalho e matéria orgânica, sendo 16% de argila, 38% de silte, 31% de areia fina, 10% de areia média, 4% de areia grossa e 1% de pedregulho, classificado como areia fina silto-argilosa. Este apresenta umidade ótima de 30,7% e massa específica de 1331 Kg/m³.

A escolha das vegetações foi influenciada pela utilização usual dos sistemas. Para o sistema alveolar simples, que é muito utilizado com forrações, foi escolhida a grama (grama esmeralda), que requer pouca manutenção, se comparada com a maioria das gramas. Já para o sistema hexa, muito utilizado com plantas suculentas, foi empregado o *Sedum* (*Sedum Reflexum*), por possuir baixa manutenção e demais características já mencionadas no capítulo 2. As Figuras 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11 representam o esquema das camadas dos experimentos.

Tabela 3.1– Especificações das medições

Experimentos	Especificações das camadas	Espessura
<u>Experimento 01-</u> Sistema alveolar com 2,5cm de substrato	-membrana de proteção antirraízes (PEAD)	0,02cm
	-membrana alveolar (placa plástica reciclada)	2,8cm
	-membrana de retenção de nutrientes (fibra)	0,5cm
	-substrato	2,5cm
Total:		5,82cm
<u>Experimento 02-</u> Sistema alveolar com grama	-membrana de proteção antirraízes (PEAD)	0,02cm
	-membrana alveolar (placa plástica reciclada)	2,8cm
	-membrana de retenção de nutrientes (fibra)	0,5cm
	-substrato	4,0 cm
	-grama esmeralda	2,5cm
Total:		9,82cm
<u>Experimento 03-</u> Sistema alveolar com 4 cm de substrato	-membrana de proteção antirraízes (PEAD)	0,02cm
	-membrana alveolar (placa plástica reciclada)	2,8cm
	-membrana de retenção de nutrientes (fibra)	0,5cm
	-substrato	4,0cm
Total:		7,32cm
<u>Experimento 04-</u> Sistema hexa com 4 cm de substrato	-membrana de proteção antirraízes (PEAD)	0,02cm
	-membrana hexa	7,0cm
	-argila expandida (dentro)	1,0cm
	-substrato (dentro)	4,0cm
Total:		7,02cm
<u>Experimento 05-</u> Sistema hexa com 6cm de substrato	-membrana de proteção antirraízes (PEAD)	0,02cm
	-membrana hexa	7,0cm
	-argila expandida (dentro)	1,0cm
	-substrato (dentro)	6,0cm
Total:		7,02cm
<u>Experimento 06-</u> Sistema hexa com <i>sedum</i>	-membrana de proteção antirraízes (PEAD)	0,02cm
	-membrana hexa	7,0cm
	-argila expandida (dentro)	1,0cm
	-substrato (dentro)	6,0cm
	- <i>sedum</i>	8,0cm
Total:		15,02cm

No experimento 01 a composição das camadas foi seguida de membrana de proteção antirraízes (PEAD) com espessura de 0,02 cm, membrana alveolar (placa plástica reciclada) com espessura de 2,8 cm, membrana de retenção de nutrientes (fibra) com espessura de 0,5cm e substrato com espessura de 2,5cm, como está ilustrado na Figura 3.6.

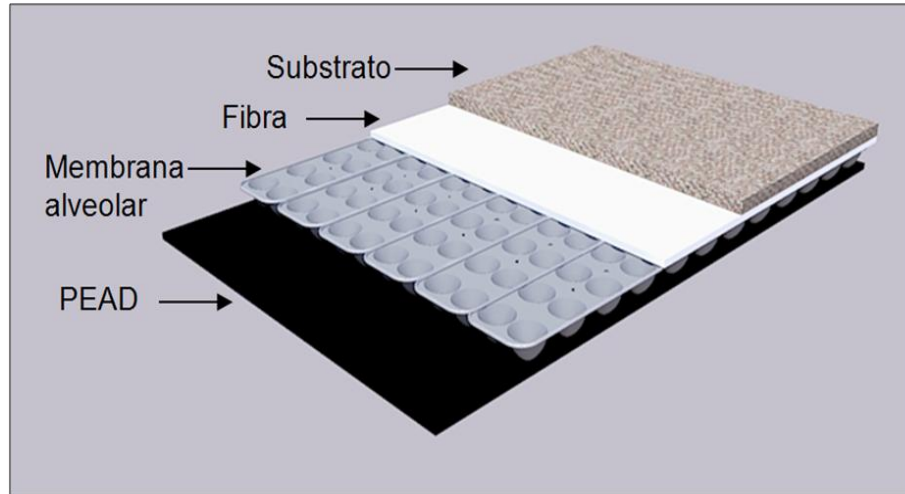


Figura 3.6– Esquema experimento 01- Alveolar com substrato de 2,5 cm

No experimento 02 (Figura 3.7), a composição das camadas foi seguida de membrana de proteção antirraízes (PEAD) com espessura de 0,02 cm, membrana alveolar (placa plástica reciclada) com espessura de 2,8 cm, membrana de retenção de nutrientes (fibra) com espessura de 0,5cm, substrato com espessura de 4 cm e vegetação com altura de 2,5cm (grama esmeralda). A composição do experimento 03 (Figura 3.8) é equivalente à utilizada no experimento 02, porém sem a vegetação.

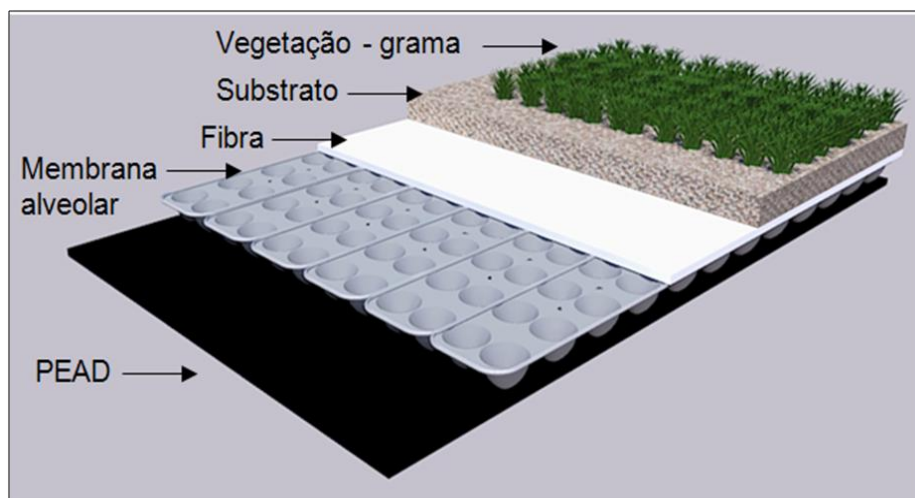


Figura 3.7– Esquema experimento 02- Alveolar com grama

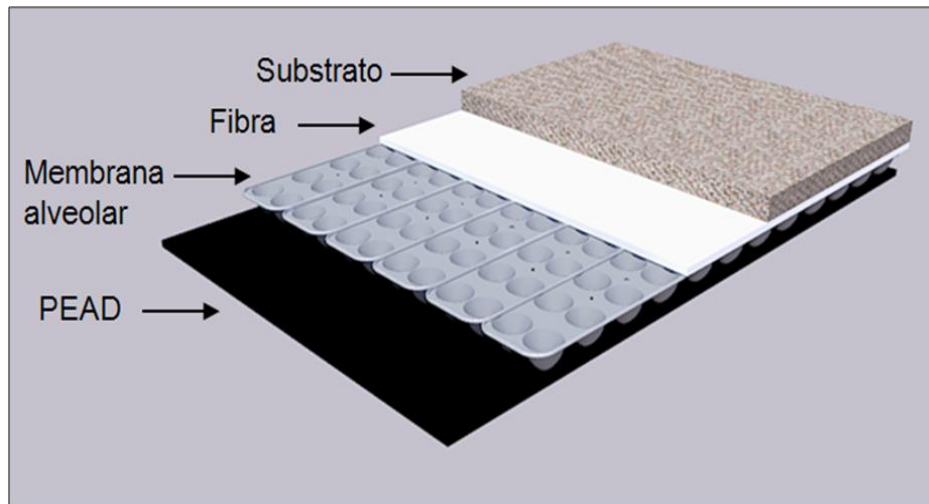


Figura 3.8– Esquema experimento 03- Alveolar com substrato de 4 cm

As camadas no experimento 04 (Figura 3.9) foram compostas de membrana de proteção antirraízes (PEAD) com espessura de 0,02 cm, membrana hexa (placa plástica reciclada) com espessura de 7,0 cm, membrana de retenção de nutrientes (argila expandida) com camada de 1,0 cm e substrato com espessura de 4 cm. A composição do experimento 05 (Figura 3.10) compreendeu as mesmas camadas do experimento 04, porém nessa foram acrescentados 2,0 cm na camada de substrato, ou seja, o substrato ficou com altura total de 6,0 cm.

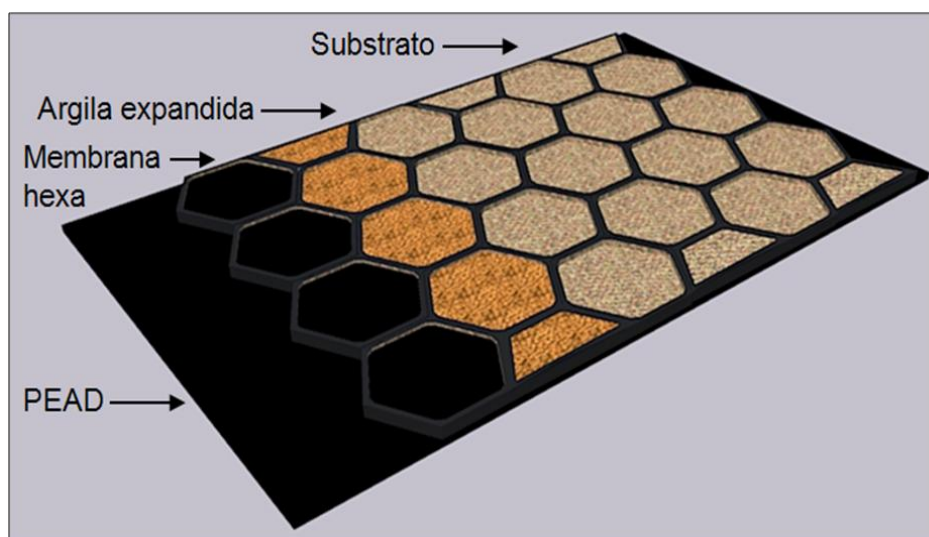


Figura 3.9– Esquema experimento 04- Hexa com substrato de 4 cm

Um detalhe importante a ser observado é a altura total dos experimentos 04 e 05: ambos possuem altura de 7,02 cm, em virtude de a membrana hexa/placa (bandeja) possuir 7,0 cm, e o PEAD 0,02 cm, e as camadas encontrarem-se dentro da placa. No experimento 06 (Figura 3.11), a composição das camadas foi idêntica à do experimento 05, contudo foi-lhe acrescentada uma camada de vegetação (*sedum*) com 8,0 cm de altura.

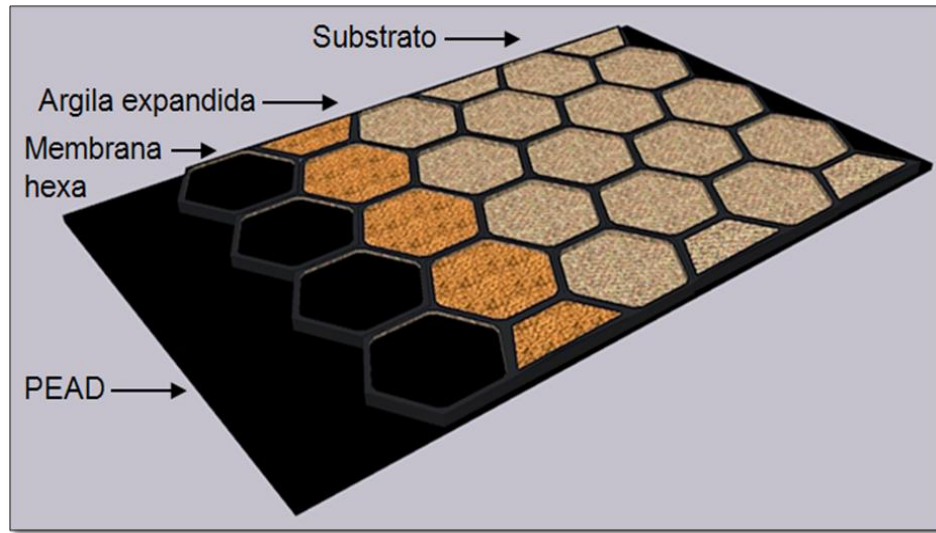


Figura 3.10– Esquema experimento 05- Hexa com substrato de 6 cm

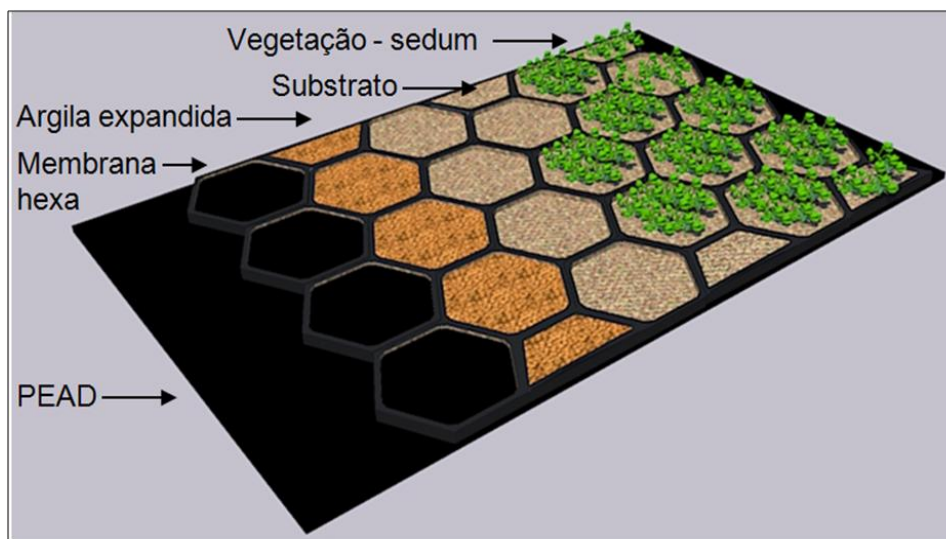


Figura 3.11– Esquema experimento 06- Hexa com *sedum*

Em suma, todos os sistemas foram construídos com camadas de impermeabilização, membrana de placa plástica, membrana de absorção e substrato. Entretanto, dois experimentos dos sistemas, além das camadas supracitadas, receberam em sua composição uma camada de vegetação.

4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS

Este capítulo compreende a análise de resultados experimentais de dois sistemas modulares de telhados verdes brasileiros, o hexa e o alveolar. Como esses sistemas possuem materiais porosos, foi possível encontrar o coeficiente de absorção sonora, devido a sua eficácia em tratamentos acústicos.

Inicialmente são mostradas as etapas da realização dos experimentos em câmara reverberante, onde os dois sistemas modulares de telhados verdes foram ensaiados. Cada sistema foi analisado em três situações, totalizando seis experimentos, e sendo apresentado o procedimento do cálculo.

A análise dos resultados dos ensaios das amostras está dividida em duas seções: primeiramente se apresenta uma análise individual e *a posteriori* uma análise comparativa entre os seis experimentos; Além disso, realiza-se o cotejo entre os valores encontrados nesta pesquisa e os resultados das pesquisas sobre telhados verdes em outros países.

4.1 Procedimentos experimentais

As medições dos experimentos foram executadas de acordo com a Tabela 3.1 das especificações das medições. Foram dispostas seis medições de cada amostra e, conforme a ISO 354, a metragem se enquadrou em 11,66m² em ambos os sistemas. As amostras ao seu redor foram revestidas com placas de madeira, com o objetivo de anular a absorção lateral da bancada.

Os microfones foram dispostos distanciados mais de 3 metros da fonte sonora, conforme esquematização do ensaio (Figura 3.5). Por exemplo, o primeiro ensaio foi F1 com M1 e M2, o segundo F1 com M2 e M3, e assim sucessivamente. As Figuras 4.1 e 4.2 ilustram um exemplo de duas medições efetuadas, uma sem e outra com amostra.



Figura 4.1– Esquema ensaio câmara reverberante vazia



Figura 4.2– Esquema ensaio câmara reverberante com amostra

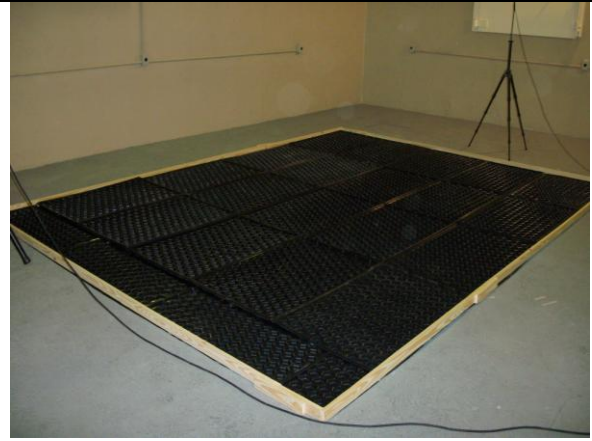
Em síntese, para cada medição, foram avaliados dois decaimentos do nível de pressão sonora, com os quais foi calculada a média aritmética para a obtenção do valor final do tempo de reverberação.

4.1.1 Medições das amostras do sistema modular alveolar simples de telhado verde

De acordo com a Norma ISO 354, as medições do tempo de reverberação foram realizadas primeiramente em câmara vazia e posteriormente com as amostras do sistema alveolar com substrato e planta conforme a já ilustrada Tabela 3.1. As etapas de montagem dos sistemas foram elaboradas conforme a Figura 4.3.



1° Colocação de membrana de proteção antirraízes



2° Colocação de membrana alveolar



3° Colocação de fibra - retenção de nutrientes



4° Colocação de substrato



5° Colocação da grama

Resumo:

Experimento 01: Compreende desde a colocação da membrana de proteção antirraízes até a colocação do substrato 2,5cm.

Experimento 02: Compreende desde a colocação da membrana de proteção antirraízes até a colocação de grama.

Experimento 03: Compreende desde a colocação da membrana de proteção antirraízes até a colocação de substrato 4cm.

Figura 4.3– Experimentos 01, 02 e 03- Etapas montagem sistema alveolar

No experimento 01, a temperatura nas medições permaneceu em 16,9°C e sua respectiva umidade relativa em 77%. No experimento 02, a temperatura nas medições manteve em 16,9°C e sua umidade relativa em 73%. Já no experimento 03, a temperatura e a umidade relativa foram respectivamente 17,3°C e 74%.

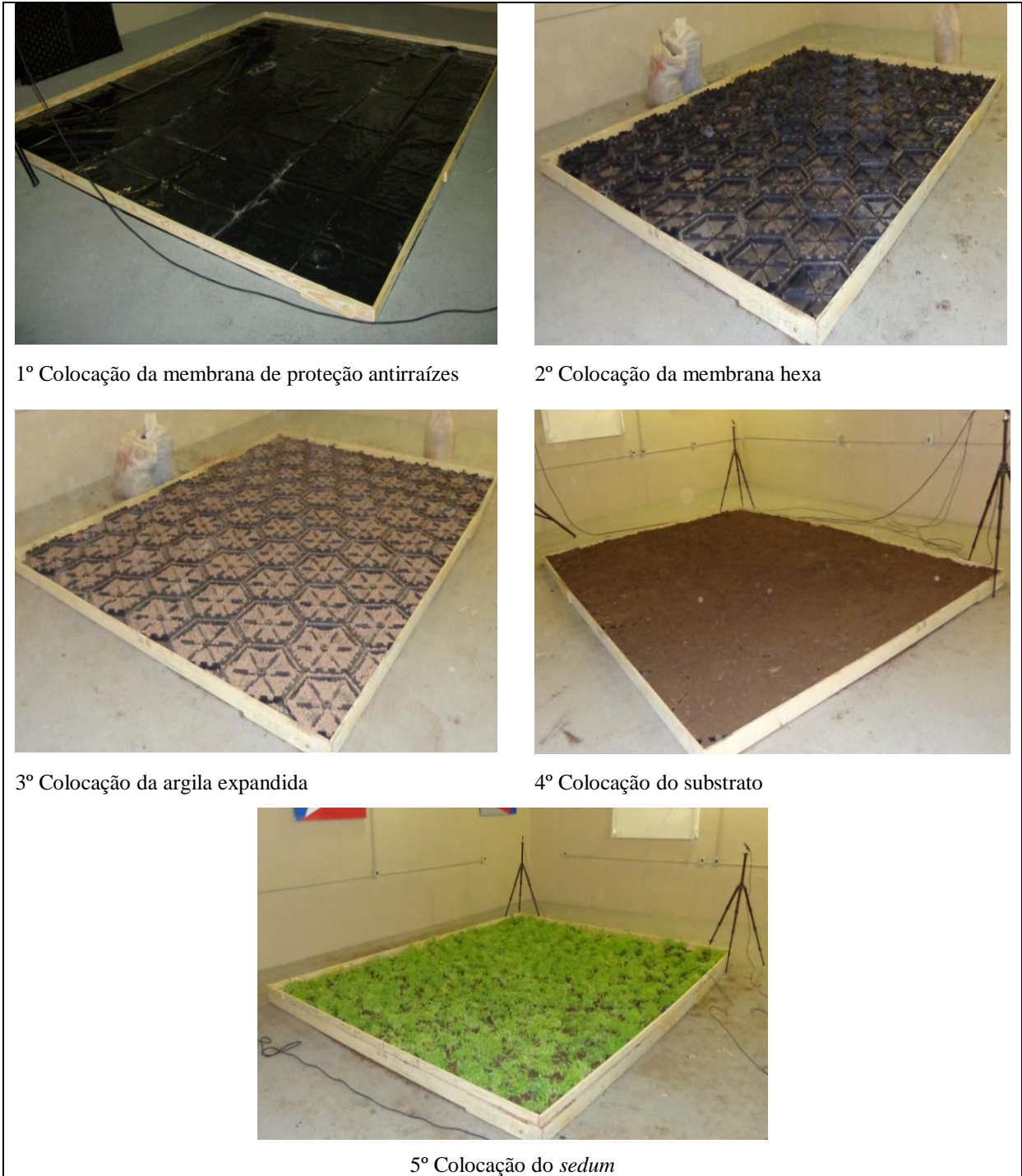
As medições das amostras dos experimentos 01, 02 e 03 do sistema alveolar foram efetuadas em condições de temperatura e umidade ambientais da câmara. Porém, é interessante citar que, no experimento 02 (com grama esmeralda), as amostras de grama e o substrato estavam molhados, pelo fato de as gramas estarem, anteriormente ao momento das medições, expostas a condições externas de temperatura e umidade.

4.1.2 Medições das amostras do sistema modular hexa de telhado verde

As medições do tempo de reverberação com as amostras do sistema hexa foram propostas com substrato e planta conforme Tabela 3.1. As etapas de montagem dos respectivos sistemas foram elaboradas conforme a Figura 4.4.

No experimento 04, a temperatura nas medições se manteve em 17,4°C e sua respectiva umidade relativa em 64%. No experimento 05, a temperatura permaneceu em 17,4°C, porém sua umidade relativa variou para 62%. Já no experimento 06, a temperatura foi para 17,9°C e a umidade relativa para 74%.

As medições dos experimentos do sistema hexa ocorreram em condições ambientais da câmara e com a umidade normal dos materiais. O teor de Umidade Ótima do substrato estava em 30,7% e a massa específica máxima de 1331 Kg/m³, o que é considerado um material leve em virtude da quantidade de matéria orgânica.



Resumo:

Experimento 04: Compreende desde a colocação da membrana de proteção antirraízes até a colocação do substrato 4cm.

Experimento 05: Compreende desde a colocação da membrana de proteção antirraízes até a colocação do substrato 6cm

Experimento 06: Compreende desde a colocação da membrana de proteção antirraízes até a colocação do *sedum*.

Figura 4.4– Experimentos 04, 05 e 06- Etapas montagem sistema hexa

4.1.3 Cálculo do coeficiente de absorção sonora

Para a determinação do coeficiente de absorção sonora (α) dos experimentos, foram utilizadas as câmaras reverberantes da UFSM. Sabe-se que, a partir do cálculo médio do tempo de reverberação, consegue-se encontrar o coeficiente α . O primeiro ensaio foi realizado com a câmara vazia, e depois com os experimentos da Tabela 3.1. Programando-se a equação 3.1, para $n=1$ (câmara reverberante sem amostra), pelo Matlab, apresentam-se na Tabela 4.1 os valores calculados para a área efetiva em bandas de 1/3 de oitava para diferentes tempos de decaimento.

Tabela 4.1– Área de absorção equivalente da câmara reverberante, sem amostra.

Data: set/13	Câmara vazia			
Frequência	T20	T30	A1	α
100	17,81	17,47	1,87	-----
125	16,17	17,67	1,83	-----
160	18,67	19,39	1,62	-----
200	17,14	17,75	1,73	-----
250	16,20	16,40	1,83	-----
315	16,86	17,1	1,67	-----
400	15,34	15,53	1,79	-----
500	14,99	15,25	1,75	-----
630	14,38	14,40	1,79	-----
800	13,31	13,20	1,90	-----
1000	11,46	11,43	2,16	-----
1250	9,92	9,86	2,44	-----
1600	9,01	9,01	2,44	-----
2000	7,78	7,75	2,60	-----
2500	6,41	6,43	2,80	-----
3150	5,08	5,14	3,00	-----
4000	3,93	3,93	3,18	-----
5000	3,10	3,14	2,65	-----
Equipamento: MNPS 2270				
UR: 64% T: 15,5°C		Instrumento medição <i>Higro-Thermometer</i>		

Para a determinação do coeficiente de absorção sonora, foi programada novamente a equação 3.1; para $n=2$, determinou-se a área de absorção equivalente da câmara com a amostra, A2. Conhecidos então A2 e A1, programou-se então a equação 3.2, a fim de se obter o parâmetro A: área de absorção sonora equivalente da amostra. Conhecido este parâmetro, determinou-se finalmente o valor do coeficiente de absorção sonora da amostra (α), por

bandas de 1/3 de oitava, de acordo com a equação 3.3. Os resultados obtidos calculados com base no tempo de reverberação T20 e T30, para os seis experimentos, são apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3. Os relatórios dos ensaios dos coeficientes de absorção sonora são apresentados nos Apêndices A, B, C, D, E e F.

Tabela 4.2– Coeficiente de absorção sonora das amostras dos experimentos 01, 02 e 03

Amostra	Experimento 01: Alveolar com 2,5cm de substrato				Experimento 02: Alveolar com grama				Experimento 03: Alveolar com 4cm de substrato			
	T20	T30	A2	α	T20	T30	A2	α	T20	T30	A2	α
100	7,65	8,15	4,10	0,16	5,59	5,76	5,78	0,31	6,59	6,49	5,12	0,25
125	7,56	7,96	4,20	0,18	5,02	5,12	6,49	0,38	5,65	5,78	5,73	0,31
160	8,02	8,72	3,70	0,16	4,65	5,21	6,34	0,37	5,99	6,08	5,41	0,30
200	7,59	7,70	4,20	0,21	4,90	5,15	6,37	0,38	5,80	5,90	5,53	0,32
250	4,86	5,01	6,50	0,39	2,93	3,22	10,21	0,70	3,27	3,54	9,26	0,62
315	4,13	4,19	7,70	0,50	2,72	2,90	11,28	0,80	3,11	3,29	9,89	0,68
400	3,08	3,28	9,80	0,67	2,56	2,77	11,73	0,83	2,73	2,79	11,62	0,82
500	2,70	2,88	11,20	0,78	2,71	2,96	10,85	0,75	2,54	2,84	11,30	0,79
630	2,32	2,47	13,00	0,92	2,85	2,86	11,14	0,77	2,58	2,64	12,09	0,85
800	2,27	2,36	13,50	0,97	2,79	2,84	11,11	0,77	2,47	2,54	12,46	0,88
1000	2,14	2,23	14,20	1,00	2,86	2,85	10,93	0,73	2,47	2,45	12,81	0,89
1250	2,18	2,26	13,80	0,95	2,85	2,80	10,98	0,71	2,40	2,40	12,93	0,87
1600	2,27	2,33	13,10	0,89	2,75	2,74	10,97	0,71	2,35	2,35	12,96	0,87
2000	2,33	2,37	12,50	0,82	2,56	2,57	11,41	0,73	2,23	2,24	13,31	0,89
2500	2,18	2,25	12,80	0,82	2,47	2,42	11,66	0,73	2,11	2,12	13,62	0,89
3150	2,02	2,05	13,30	0,85	2,22	2,20	12,13	0,74	2,02	2,01	13,62	0,87
4000	1,91	1,90	13,20	0,82	2,01	2,01	12,09	0,72	1,83	1,83	13,84	0,87
5000	1,75	1,77	12,40	0,75	1,80	1,79	11,95	0,71	1,70	1,68	13,38	0,83
Equipamento: MNPS 2270												
Data:	Setembro/13 UR: 77% ; T:16,9°C				Setembro/13 UR: 73%; T: 16,9°C				Outubro/13 UR:74% ; T:17,3°C			

Para facilitar a análise comparativa, foi calculado o coeficiente de redução de ruído (NRC), sendo a média dos coeficientes de absorção sonora das bandas de oitava entre 250 Hz a 2 kHz, de acordo com a equação 2.4, sendo $NRC = 1 [\alpha (250 \text{ Hz}) + \alpha (500 \text{ Hz}) + \alpha (1.000 \text{ Hz}) + \alpha (2.000 \text{ Hz}) / 4]$

Para tanto, os coeficientes de redução de ruído calculados dos experimentos 01 ao 06 são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.3– Coeficiente de absorção sonora das amostras dos experimentos 04, 05 e 06

Amostra	Experimento 04: Hexa com 4cm substrato				Experimento 05: Hexa com 6cm substrato				Experimento 06: Hexa com <i>sedum</i>			
	Frequênc. (Hz)	T20	T30	A2	α	T20	T30	A2	α	T20	T30	A2
100	12,04	11,65	2,83	0,06	8,75	8,84	3,74	0,14	8,14	8,15	4,07	0,16
125	10,82	11,56	2,83	0,07	8,11	8,73	3,77	0,15	6,47	6,94	4,76	0,23
160	11,18	11,73	2,75	0,07	7,23	7,69	4,24	0,20	5,99	6,62	4,96	0,26
200	10,62	11,03	2,88	0,09	7,10	7,56	4,27	0,21	6,35	6,70	4,85	0,26
250	7,62	7,84	4,05	0,18	4,00	4,24	7,68	0,49	3,52	3,73	8,77	0,58
315	6,59	6,70	4,70	0,25	3,41	3,63	8,93	0,60	3,11	3,27	9,95	0,69
400	4,62	4,88	6,47	0,39	2,69	2,90	11,17	0,78	2,60	2,75	11,79	0,83
500	3,67	3,74	8,48	0,55	2,65	2,78	11,57	0,81	2,56	2,69	11,95	0,84
630	2,71	2,93	10,85	0,75	2,45	2,61	12,26	0,86	2,40	2,52	12,68	0,90
800	2,53	2,58	12,29	0,87	2,47	2,44	13,04	0,93	2,42	2,40	13,21	0,94
1000	2,50	2,55	12,31	0,85	2,38	2,43	12,96	0,90	2,38	2,38	13,20	0,92
1250	2,35	2,41	12,89	0,87	2,30	2,37	13,13	0,89	2,32	2,32	13,39	0,91
1600	2,40	2,42	12,54	0,84	2,28	2,31	13,19	0,89	2,33	2,31	13,19	0,89
2000	2,28	2,36	12,49	0,82	2,24	2,24	13,23	0,88	2,25	2,23	13,36	0,89
2500	2,30	2,30	12,23	0,78	2,11	2,16	13,13	0,85	2,14	2,11	13,69	0,90
3150	2,14	2,16	12,16	0,75	1,98	2,00	13,32	0,84	2,02	1,99	13,79	0,88
4000	1,91	1,92	12,43	0,75	1,80	1,81	13,36	0,83	1,80	1,80	14,16	0,90
5000	1,72	1,73	11,91	0,70	1,63	1,66	12,51	0,75	1,61	1,63	14,05	0,88
Equipamento: MNPS 2270												
Data:	Outubro/13 UR: 64% ; T:17,4°C				Outubro/13 UR: 62% ; T:17,4°C				Outubro/13 UR: 74%;T:17,9°C			

Tabela 4.4– Coeficiente de redução sonora -NRC- dos experimentos

Experimentos	Espessura total (cm)	NRC
<u>Experimento 01-</u> Alveolar com 2,5cm de substrato	5,82	0,75
<u>Experimento 02-</u> Alveolar com grama	9,82	0,73
<u>Experimento 03-</u> Alveolar com 4 cm de substrato	7,32	0,80
<u>Experimento 04-</u> Hexa com 4 cm de substrato (dentro da placa)	7,02	0,60
<u>Experimento 05-</u> Hexa com 6 cm de substrato (dentro da placa)	7,02	0,77
<u>Experimento 06-</u> Hexa com <i>sedum</i>	15,02	0,81

Os coeficientes de absorção sonora das amostras de telhado verde e substratos obtiveram resultados variados, muito importantes para a caracterização acústica e serão comparados na seção 4.2.

4.2 Análise dos resultados das medições das amostras de telhado verde

4.2.1 Análise individual dos resultados acústicos das medições das amostras de telhado verde

Fornecendo continuidade ao abordado anteriormente e com o propósito de avaliar se os telhados verdes possuem coeficientes de absorção consideráveis, procedeu-se à análise dos resultados dos sistemas alveolar e hexa.

O método utilizado nessa dissertação, no caso o método da câmara reverberante, é aquele que apresenta resultados mais confiáveis para a determinação do coeficiente de absorção sonora. A análise individual dos sistemas modulares dos dados obtidos por esse método está na registrada nas Figuras 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10.

Pela Figura 4.5, o coeficiente de absorção sonora no sistema alveolar com 2,5cm de substrato (experimento 01) nas baixas frequências possui pouca absorção, porém nas frequências médias, pelo fato de a superfície de acabamento ser mais fina, apresenta valores ligeiramente superiores para esse coeficiente, chegando à absorção total na faixa de frequência de 1000 Hz.

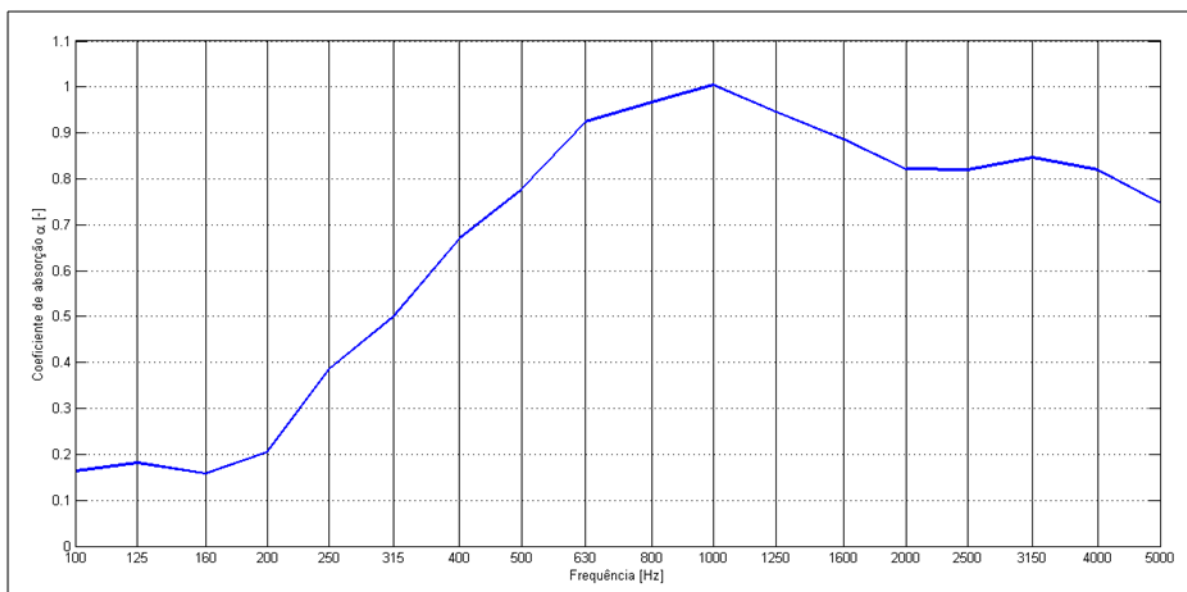


Figura 4.5– Experimento 01- Coeficientes de absorção sonora do sistema alveolar simples com 2,5 cm de substrato

Na Figura 4.6 apresenta-se o resultado para (α), levando-se em consideração o substrato com grama esmeralda com espessura total de 9,82 centímetros. O coeficiente de absorção sonora resultou próximo de $\alpha=0,4$, ou seja, absorve nas baixas frequências, se comparado com o coeficiente de muitos materiais absorventes, e sua absorção máxima ocorreu na faixa de frequência de 400 Hz, onde $\alpha=0,82$.

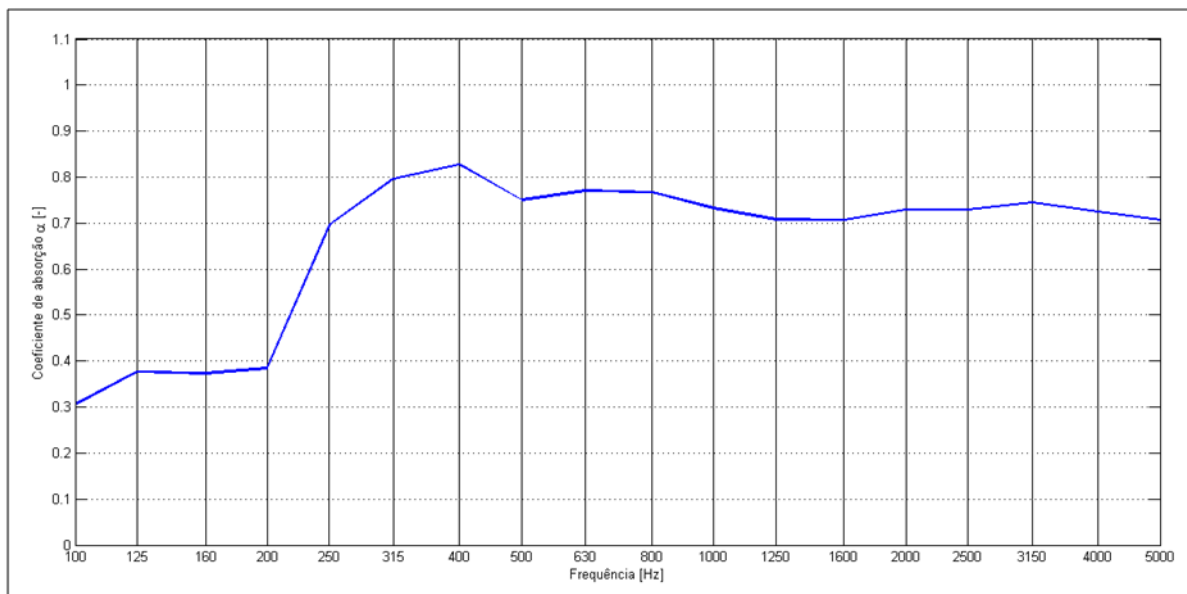


Figura 4.6– Experimento 02- Coeficientes de absorção sonora do sistema alveolar simples com grama

Observando-se a Figura 4.7, percebe-se que o coeficiente de absorção sonora no sistema alveolar com 4 cm de substrato (experimento 03) encontra-se entre 0,25 e 0,32 nas frequências de 100 a 200Hz, aumentando gradativamente à medida em que vai sendo elevada a faixa de frequência, chegando a uma absorção máxima na faixa de frequência de 2500 Hz, onde seu $\alpha=0,89$.

O coeficiente de absorção sonora do experimento 04, representado na Figura 4.8, é pouco relevante nas baixas frequências, se considerar o substrato de 4 cm de espessura e a espessura total de 7,02 centímetros, porém nas médias frequências apresenta resultados significativos, chegando seu valor máximo à faixa de 1250 Hz com um α igual a 0,87. Já nas altas frequências, tal coeficiente decresce linearmente.

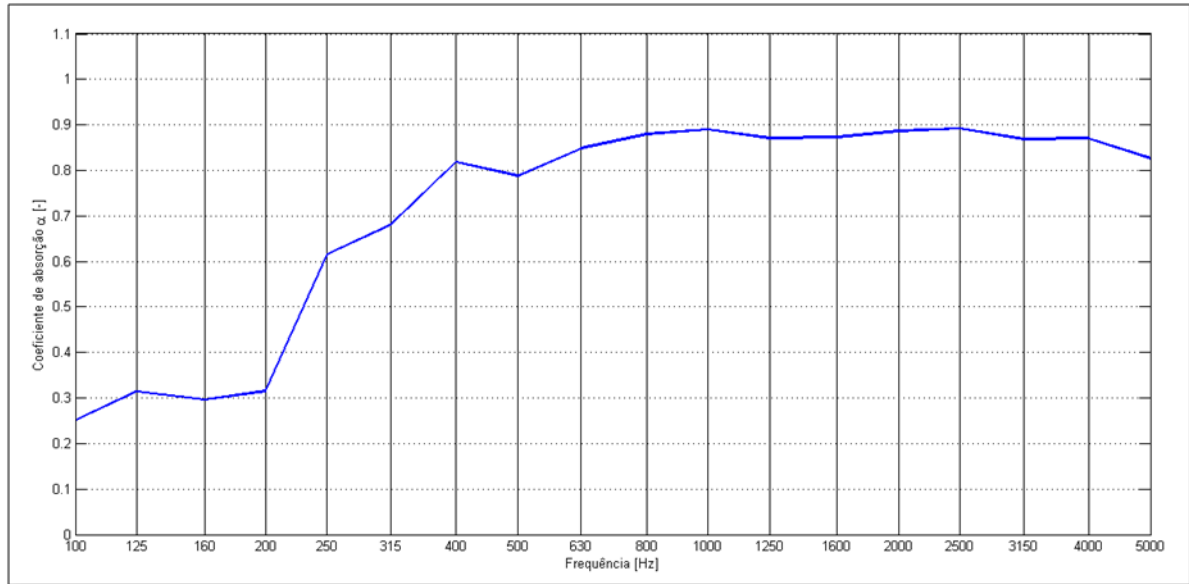


Figura 4.7– Experimento 03- Coeficientes de absorção sonora do sistema alveolar simples com 4 cm de substrato

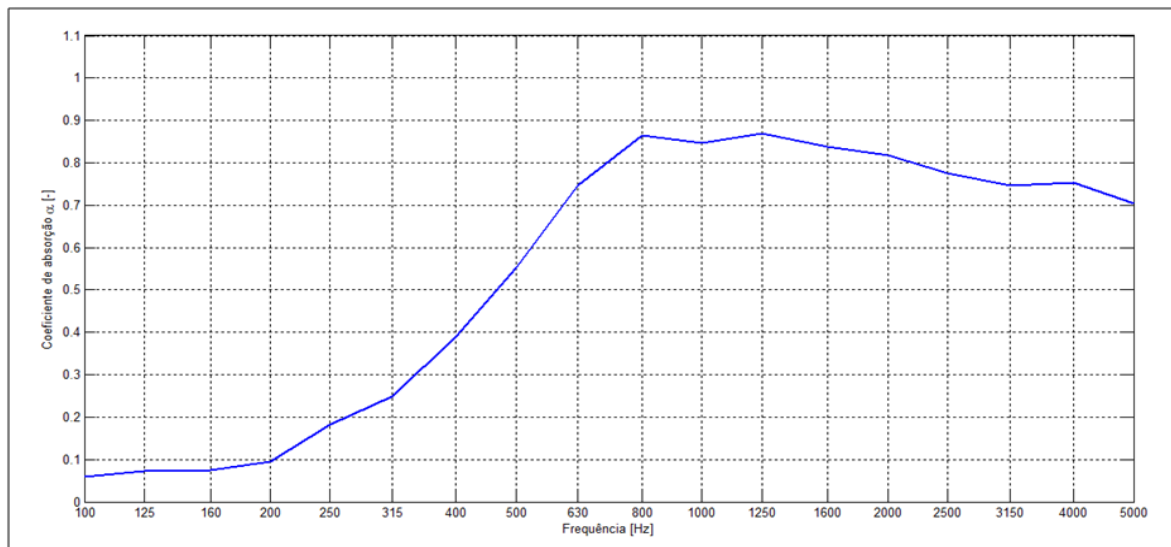


Figura 4.8– Experimento 04- Coeficientes de absorção sonora do sistema hexa com 4 cm de substrato

No experimento 05 (Figura 4.9) ocorre uma linearidade semelhante ao experimento 04, o único diferencial é que, nesse caso, como existe maior quantidade de substrato (2 cm), os valores do coeficiente de absorção são maiores.

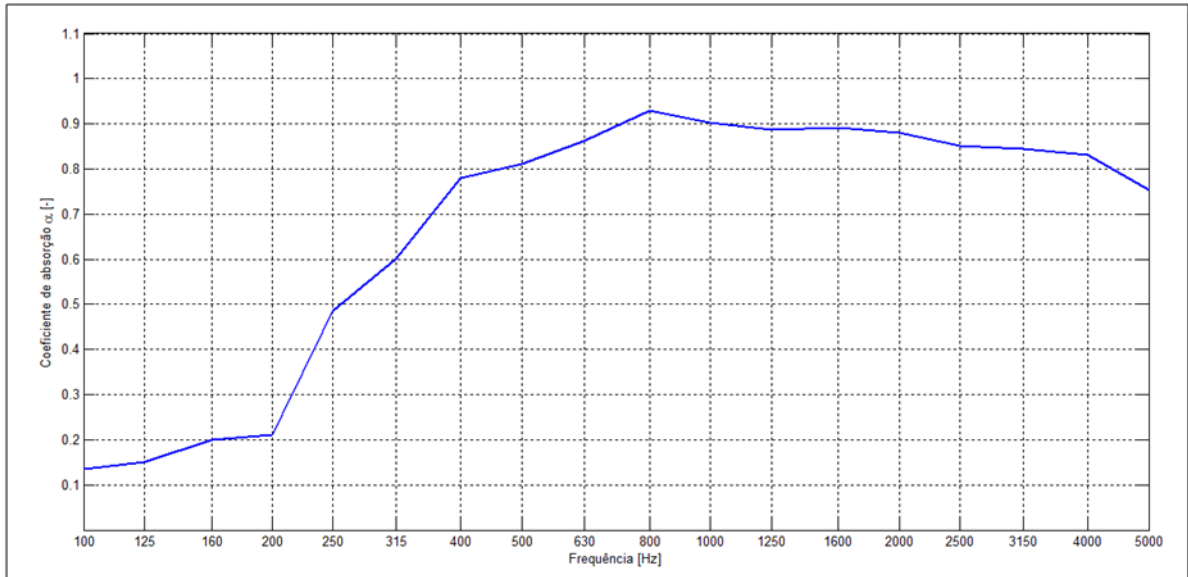


Figura 4.9– Experimento 05- Coeficientes de absorção sonora do sistema hexa com 6 cm de substrato

No experimento 06 (Figura 4.10), onde o sistema possui vegetação de *sedum* com espessura de 8cm e espessura total de 15,02 cm, o coeficiente de absorção sonora encontra-se nas baixas frequências (100-200Hz) entre 0,16 a 0,26, e se eleva à medida que aumenta a faixa de frequência, permanecendo harmônico nas altas frequências.

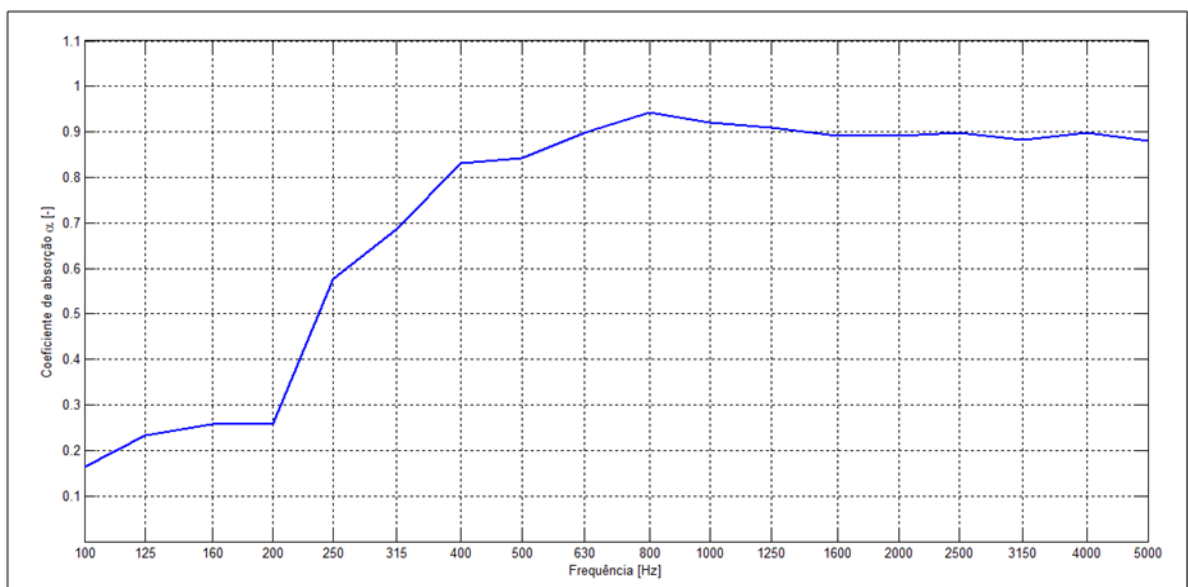


Figura 4.10– Experimento 06-Coefficientes de absorção sonora do sistema hexa com *sedum*

Cada experimento apresenta suas características e particularidades, com coeficientes interessantes em determinadas faixas de frequência. Entretanto, analisados individualmente, algumas respostas não ficam muito claras, o que carece de uma análise comparativa entre todos os resultados.

4.2.2 Análise comparativa dos resultados acústicos das medições das amostras de telhado verde

De acordo com a Figura 4.11, o coeficiente de absorção sonora no sistema alveolar com 2,5cm de substrato (experimento 01) nas baixas frequências possui propriedades de absorção sonoras menores que os outros dois sistemas. Contudo, em frequências médias, esse coeficiente apresenta valores ligeiramente superiores, chegando à absorção total na faixa de frequência de 1000 Hz. No sistema com 4 cm de substrato (experimento 03), o coeficiente (α) é mais elevado nas faixas de altas frequências do que nos outros dois sistemas. O sistema com 4 cm de substrato é mais eficaz na absorção em baixas frequências que o sistema de substrato de 2,5cm, o que ocorre devido à maior camada de substrato existente.

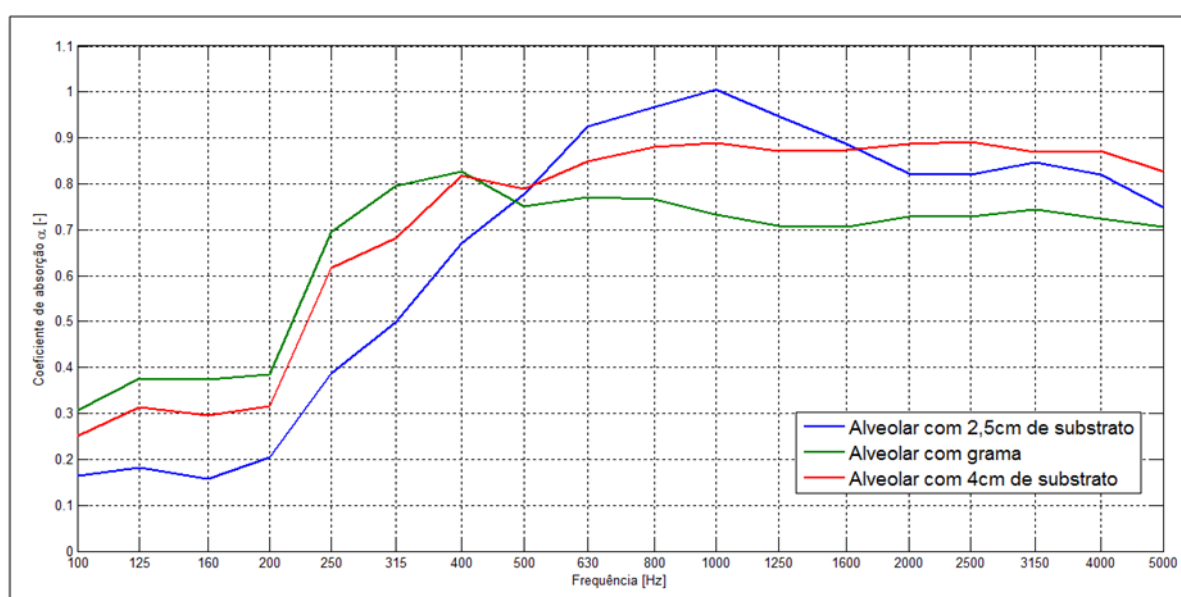


Figura 4.11– Comparação dos coeficientes de absorção sonora do sistema alveolar simples

Quando se colocam plantas, nesse caso a grama esmeralda (experimento 02), o coeficiente de absorção torna-se maior na faixa de baixas frequências, sendo muito interessante para controle de ruído de tráfego urbano. Porém a partir de 400 Hz sua absorção não se torna mais tão eficaz como nos outros dois experimentos. Isso pode ser devido à forma da grama ser mais linear e possuir uma folha de formato plano e fino. Outro fator a ser fixado é que a grama, no momento do ensaio estava um pouco úmida, o que segundo Connelly (2011), quanto mais umidade o material tiver, pode haver influência nos valores de absorção sonora. E os outros dois sistemas estavam em condições secas, apenas com a umidade natural do substrato. Por conseguinte, o mesmo possui propriedades de absorção sonora consideráveis pelo fato de ser poroso.

Conforme a Figura 4.12, o coeficiente de absorção sonora no sistema hexa com 4 cm de substrato (experimento 04) nas baixas, médias e altas frequências é menos absorvedor que os outros dois sistemas. Quando é aumentada a quantidade da camada de substrato para 6 cm (experimento 05), percebe-se que o valor do coeficiente de absorção eleva-se em todas as faixas de frequência. Quando há a utilização de plantas, nesse caso o *sedum* (experimento 06), o valor do coeficiente de absorção adquire resultados superiores aos outros dois experimentos.

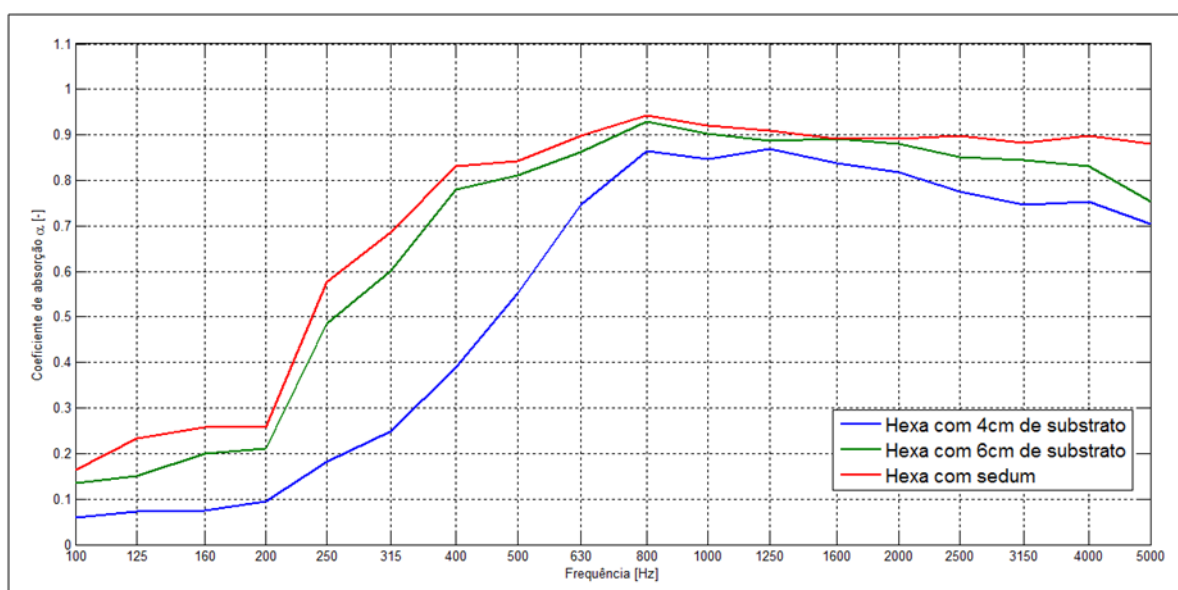


Figura 4.12– Comparação dos coeficientes de absorção sonora do sistema hexa

Quando utilizado o *sedum*, a maior absorção ocorre na faixa de frequência de 800 Hz, chegando a um α próximo de 0,95; logo, para o sistema hexa o uso de plantas no telhado verde é mais eficaz para todas as faixas de frequências. Acredita-se que isso possa ocorrer devido ao formato e à textura da planta, além de uma espessura total de 15,02cm.

De mesmo modo, o experimento 06 apresenta valores de coeficiente de absorção sonora ligeiramente superiores aos outros dois experimentos na faixa de altas frequências. Isso ocorre devido à maior tortuosidade da superfície de acabamento do material, que lhe confere assim uma maior área de absorção e, por conseguinte, atingem valores mais elevados para o coeficiente de absorção sonora.

Os resultados de todos os experimentos foram agrupados na Figura 4.13, onde se podem comparar com maior ênfase os sistemas estudo. O sistema alveolar simples com grama (experimento 02) foi o que resultou o maior coeficiente de absorção na faixa de baixas frequências. O sistema alveolar com 2,5 cm de substrato (experimento 01) obteve maiores coeficientes na faixa das médias frequências entre 500 e 1600 Hz, chegando à máxima absorção em 1000 Hz. Já o sistema que apresentou maiores coeficientes de absorção nas faixas de altas frequências foi o hexa com vegetação de *sedum* (experimento 06). As curvas do sistema hexa (experimentos 04, 05 e 06) demonstraram ser mais uniformes na medida em que eram adicionados os materiais (substrato e planta).

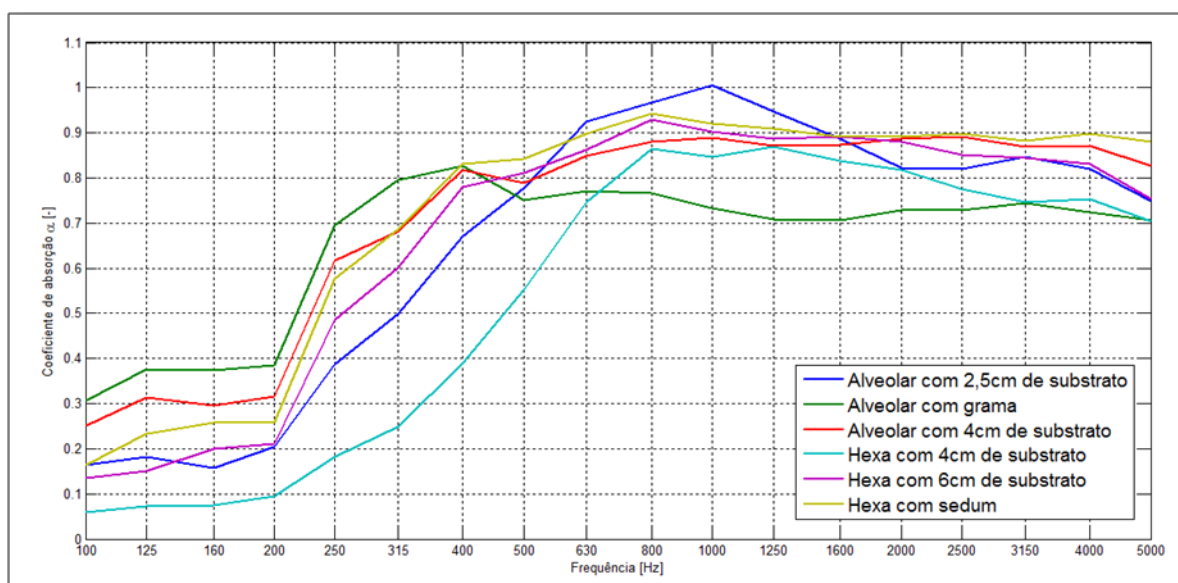


Figura 4.13– Comparação dos coeficientes de absorção sonora de todos os experimentos

Resumindo, o α máximo no sistema alveolar com 4 cm de espessura do substrato atingiu 0,89 nas frequências de 1kHz, 2kHz e 2,5 kHz, e nas baixas frequências valores de α entre 0,25 e 0,32 nas frequências de 100 a 200 Hz. Já no sistema hexa com espessura do substrato de 6 cm com *sedum*, o α máximo foi de 0,94 na frequência de 800Hz e também nas baixas frequências entre 0,16 a 0,26. O sistema alveolar com espessura de 4 cm com grama foi o que obteve maiores α (s) nas baixas frequências (de 100 a 200 Hz com valores de 0,31 a 0,38), podendo ser mais eficaz para absorção de ruído de tráfego. No geral, os coeficientes de absorção de todas as amostras dobraram de valor na faixa de 250 Hz em relação a 200 Hz.

Conclui-se que o comportamento nos experimentos é diferente, porém no geral eles apresentam semelhança na ascendência do valor para o coeficiente de absorção sonora, ou seja, há pequena absorção sonora em baixas frequências. A partir de 200 Hz, há um aumento considerável no coeficiente de absorção, principalmente na faixa de médias frequências, o que sugere a importância deste material no controle de ruído urbano.

A queda acentuada na absorção em baixas frequências - abaixo de 250 Hz - dos experimentos dos substratos pode ser explicada pela diminuição intergranular do espaço poroso associado com um aumento de tamanho de partículas mais finas.

A pequena espessura do substrato (principalmente no experimento 01 e 03) e/ou a presença de vegetação do tipo de *sedum* (experimento 06) aparenta ser positiva para as frequências mais altas, enquanto que para redução do ruído de baixa frequência é necessária uma maior espessura do substrato. Essa última afirmação, segundo Connelly (2011), contribui para a absorção até a espessura do substrato de 9 cm, sendo que, depois desse limite, os valores de absorção não apresentam resultados tão satisfatórios.

Com base na Figura 4.13, os experimentos 03 (alveolar com 4 cm de substrato) e 06 (hexa com *sedum*) foram os que indicaram menores oscilações e apresentaram valores interessantes no coeficiente de absorção sonora em todas as faixas de frequência, além de apresentarem em termos de NRC os maiores valores, ou seja: 0,80 e 0,81 respectivamente. Além disso, o ar interno pode ter influenciado positivamente nas medições dessas amostras, pois o mesmo tem o poder de absorver maior energia em altas frequências, principalmente a partir de 2000 Hz.

No geral, os experimentos demonstraram que os mecanismos de absorção sonora dos telhados analisados assemelham-se a família dos materiais porosos, com eficácia nas altas frequências dependendo, esses materiais porosos, de sua espessura e densidade.

Além disso, acredita-se que a área seja um parâmetro de grande influência de absorção sonora, ou seja, a absorção de ruído externo em determinada localidade poderia ser considerável se muitas edificações possuíssem telhados verdes.

4.2.2.1 Análise comparativa dos resultados acústicos das medições das amostras de telhado verde com materiais absorventes e outros tipos de coberturas

Os materiais usualmente utilizados para a absorção sonora são os fibrosos ou porosos. Um exemplo de material poroso é a espuma flexível de poliuretano poliéster (Tabela 4.5) que possui α de 0,47 e 0,82, nas frequências de 2 e 4 kHz respectivamente e NRC de 0,44 (espessura de 6 cm). Na espessura de 7 cm possui α de 0,66 e 0,95, nas frequências de 2 e 4kHz e NRC de 0,64. O experimento 01, com apenas 2,5cm de substrato e totalizando uma espessura de 5,82cm, apresentou α de 0,82 em ambas as frequências de 2 e 4 kHz e NRC de 0,75, sendo maiores que a espuma supracitada. Já nos experimentos 4 e 5 (7,02 cm de espessura), pela proximidade na espessura total da espuma de 7 cm, apresentaram maiores α (s) apenas na frequência de 2 kHz, sendo 0,82 e 0,88 na devida ordem.

Os telhados verdes se destacam por sua eficiência em absorção sonora, mas comparando com o popular Sonex (Tabela 4.5) que possui um NRC de 0,72 na espessura de 5 cm e 0,89 na espessura de 7,5cm, seus coeficientes são menores.

Tabela 4.5– Comparação dos experimentos de telhado verde com materiais absorventes

Material/amostra	Espessura	2kHz	4kHz	NRC
Experimento 01-alveolar	5,82cm	0,82	0,82	0,75
Experimento 04-hexa	7,02cm	0,82	0,75	0,60
Experimento 05-hexa	7,02cm	0,88	0,83	0,77
Espuma flexível de poliuretano poliéster incombustível – Expumex (Bistafa, 2006)	6,00cm	0,47	0,82	0,44
	7,00cm	0,66	0,95	0,64
	7,50cm	1,00	1,00	0,85
Espuma flexível de poliuretano poliéster (com retardador chama) – Sonex illbruck (Bistafa, 2006)	5,00cm	0,97	1,01	0,72
	7,50cm	1,07	1,00	0,89

Telhados verdes sem plantas (substrato como última camada) ou com plantas possuem um desempenho acústico bem superior à maioria das coberturas convencionais.

Como se pode observar na Tabela 4.6, o coeficiente de absorção de um concreto aparente, tratado e polido, como por exemplo, de uma laje de cobertura, é entre 0,01 à 0,02 nas frequências de 125 a 4kHz, totalizando um NRC de 0,02, algo mínimo se comparado aos resultados dos experimentos 01 ao 06, que chegam a um NRC de até 0,81. Uma telha em fibrocimento, onde o NRC=0,01, é outro exemplo de telha com baixa absorção sonora. Porém a telha acústica¹⁰ apresenta valores absorvedores superiores a quase todos os tipos de coberturas.

Tabela 4.6 – Comparação dos experimentos de telhado verde com outras coberturas

Material	2 kHz	4 kHz	NRC
Experimento 06- <i>sedum</i>	0,89	0,90	0,81
Concreto aparente -laje cobertura (Bistafa, 2006)	0,02	0,02	0,02
Cobertura Fibrocimento	0,01	0,01	0,01
Telha acústica (IFSC) ¹	0,99	0,99	0,94

Nota: ¹ Instituto de Física de São Carlos disponível em:

<http://www.ifsc.usp.br/~donoso/fisica_arquitetura/14_som_acustica_3.pdf>. Acesso em 16 de nov. 13

Na Figura 4.14 pode-se perceber claramente a diferença no coeficiente de absorção (α) de telhados verdes do tipo *sedum* album (50, 100, 125, 150, 175 e 200 mm de espessura) com uma laje de cobertura (*roof*). O coeficiente de absorção nessa laje analisada encontra-se próximo de 0.1, enquanto que com telhado verde o coeficiente de absorção encontra-se entre 0.1 e 0.65, dependendo de sua espessura.

¹⁰ Produto projetado e indicado para o isolamento de cobertura e fechamento de ambientes com ruído externo. Tem como característica a utilização de matérias-primas como poliuretano, poliestireno e/ou lã de fibra mineral.

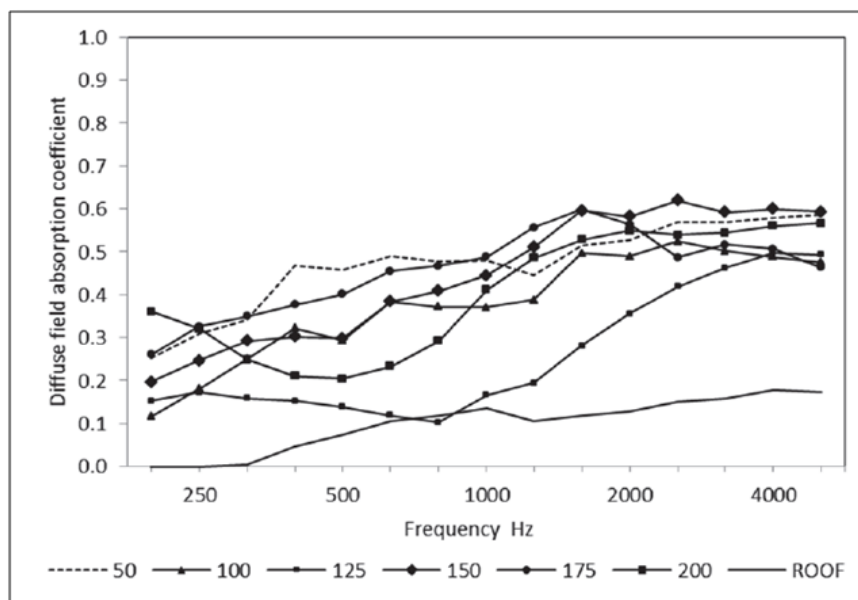


Figura 4.14– Coeficientes de absorção sonora das amostras com *sedum*
 Fonte: Conelly, 2011, p.64

Dessa maneira, os telhados verdes analisados possuem propriedades de absorções sonoras muito interessantes se comparados com as coberturas convencionais e com os materiais absorventes supracitados.

4.2.2.2 Análise comparativa dos resultados acústicos das medições das amostras de telhado verde com resultados de experimentos de telhado verde obtidos em outros países

Na pesquisa de Connelly (2011) foram utilizados sistemas comuns de telhados verdes do noroeste do Pacífico da América do Norte. Ao total foram avaliados três tipos de plantas: *Sedum album* (Figura 4.14), prado costeiro e gramíneas. Se comparar o coeficiente de redução sonora, o *sedum album* de 15 cm de Connelly (2011) apresentou um NRC de 0,63, enquanto que o *sedum reflexum* (experimento 06) apresentou NRC de 0,81, sendo um coeficiente de absorção sonora superior ao do *sedum album*.

Prosseguindo na pesquisa de Connelly (2011), o coeficiente de absorção de um substrato de 9,8cm de espessura com condições de umidade normal - composto com areia e pedra-pome e matéria orgânica - apresentou uma média de $\alpha=0,28$ a 0,75; nas frequências respectivamente de 250 a 2000 Hz. O experimento 05 - composto de areia, pedregulho, argila e matéria orgânica - realizado com maior quantidade de substrato (substrato de 6 cm e

espessura total de 7,02 cm), mesmo possuindo espessura menor que o sobredito, apresentou coeficientes de absorção superiores aos substratos norte-americanos, com α desde 0,48 até 0,90 nas frequências centrais de 250 a 2 kHz.

Na pesquisa de Yang; Kang e Choi (2012) foram utilizados sistemas encontrados na Europa, especialmente da empresa Zinco, e o substrato que resultou nos maiores coeficientes de absorção, em condições secas, foi do Zinco com 10 cm de espessura, e umidade ótima de 26,6%. O substrato do experimento 05, mesmo possuindo espessura do substrato de 6 cm, apresentou valores de coeficiente maiores nas frequências centrais, exceto para a faixa de 250 Hz, como ilustra a Tabela 4.7.

Tabela 4.7– Comparação dos experimentos de telhado verde com resultados de experimentos de telhado verde obtidos em outros países

Material	Espessura	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	NRC
Substrato norte americano (Connely, 2011)	9,80cm	0,28	0,71	0,58	0,75	0,58
Substrato (Experimento 05)	7,02cm	0,48	0,81	0,90	0,88	0,77
Substrato Zinco Europa (Yang; Kang e Choi, 2012)	10,00cm	0,60*	0,80*	0,60*	0,75*	0,69*
Substrato (Experimento 05)	7,02cm	0,48	0,81	0,90	0,88	0,77
Substrato Zinco (Yang; Kang e Choi, 2012)	5,00cm	0,17*	0,40*	0,90*	0,38*	0,46*
Substrato (Experimento 01)	5,82cm	0,40	0,80	1,00	0,80	0,75
<i>Sedum album</i> (Connelly, 2011)	15,00 cm	-	-	-	-	0,63
<i>Sedum reflexum</i> (Experimento 06)	15,02cm	0,58	0,84	0,92	0,89	0,81

Nota: * valores aproximados

Os experimentos dos telhados verdes realizados neste trabalho, assim como os experimentos encontrados em bibliografia de outros países, apresentaram estimado desempenho de absorção acústica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusão

A preocupação com questões ambientais tem mostrado seus reflexos na produção arquitetônica, e uma das medidas sustentáveis é a utilização dos telhados verdes. Essas coberturas, empregadas há décadas nos países europeus, alguns anos nos países norte-americanos e asiáticos e recentemente no Brasil, têm resultado em inúmeros benefícios, tanto em relação a conforto térmico, drenagem, redução de energia, como em relação a questões de acústica. O trabalho de pesquisa aqui apresentado mostra-se de grande importância para o desenvolvimento da área arquitetônica, já que se preocupou em caracterizar acusticamente, em termos de coeficiente de absorção, os telhados vegetados brasileiros em dois sistemas modulares comumente utilizados, o alveolar simples e o hexa.

Foram analisados dois sistemas modulares de telhados verdes, ambos com a mesma composição de substrato, porém com particularidades no esquema de montagem e no emprego de plantas diferentes, como grama no alveolar e planta do tipo *sedum* no hexa. Foram realizados três experimentos de caracterização acústica de cada sistema, sendo dois com espessuras diferenciadas de substrato e um com planta. O procedimento experimental partiu do método da câmara reverberante em campo difuso.

Pode-se afirmar que os substratos das amostras de todos os experimentos realizados possuem interessantes propriedades de absorção, por serem altamente porosos e capazes de permitir que ondas acústicas entrem em seu meio, o que constitui um atributo necessário a um material de absorção sonora devido ao grande número de interações entre as ondas e a fase sólida do substrato.

Os experimentos 03 - alveolar com 4 cm de substrato - e 06 - hexa com *sedum* foram os que indicaram menores picos e apresentaram maiores valores no coeficiente de absorção sonora em todas as faixas de frequência, além de apresentarem em termos de NRC os maiores valores. O experimento 03 e o experimento 06 demonstraram que os mecanismos de absorção sonora desses telhados se assemelham à família dos materiais porosos, com eficácia nas altas frequências. A pequena espessura do substrato e/ou a presença de vegetação

desse tipo de *sedum* aparenta ser positiva para as frequências mais altas, enquanto que para redução do ruído de baixa frequência é necessário maior espessura do substrato. O sistema alveolar com espessura de 4 cm com grama foi o que obteve maiores $\alpha(s)$ nas baixas frequências de 100 a 200 Hz com valores de 0,31 a 0,38, sendo assim mais eficaz para absorção de ruído de tráfego.

O parâmetro de profundidade, tanto com substrato como com vegetação, mostrou-se relevante, principalmente nos experimentos do sistema hexa em todas as faixas de frequência e nos experimentos do sistema alveolar na faixa de baixas frequências. Entretanto, como defendem Yang; Kang e Choi (2012), na verificação de materiais com propriedades diferentes, muitas vezes a profundidade não é significativa. Também o tipo de vegetação pode influenciar muito no coeficiente de absorção do telhado, em virtude de tipo de folhas da planta, formato, textura, área, entre outros. No caso das duas plantas utilizadas nos experimentos, o *sedum* apresentou absorção mais satisfatória, devido a sua textura, forma e maior espessura.

Os resultados obtidos indicam um alto coeficiente de absorção para os equipamentos empregados (alveolar e hexa), o que sugere que a utilização de telhados verdes pode ser uma ótima alternativa de controle de ruído urbano, já que podem contribuir para o planejamento da paisagem sonora no contexto local, desde que sejam implementadas em áreas suficientemente grandes.

Comparando os resultados encontrados nos experimentos dos dois telhados verdes brasileiros com os resultados acústicos de telhados verdes já obtidos em outros países, em condições semelhantes, observou-se que os sistemas do Brasil apresentaram valores superiores nos coeficientes de absorção sonora, tanto nos sistemas com substrato quanto naquele com planta de *sedum*.

Além disso, se comparados com algumas coberturas convencionais e alguns materiais absorventes, os telhados verdes, devido a suas propriedades, apresentam desempenho superior em termos de absorção sonora.

Espera-se que, em um futuro próximo, o planejamento da paisagem sonora seja o ponto de partida para muitos profissionais na área da construção civil, principalmente os brasileiros, de modo a voltarem sua atenção à abordagem da qualidade acústica de espaços ao ar livre com a utilização de tetos verdes. Galgando desafios de preservação ecológica e de controle de ruído urbano, que seja um estímulo na utilização de técnicas mais sustentáveis e promoção nos processos de certificação como do LEED no Brasil.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar experimentalmente as propriedades de absorção sonora em telhados verdes, ao verificar o comportamento acústico de dois sistemas modulares: hexa e alveolar simples. Entretanto, devido á complexidade do tema e à grande atenção que é dada atualmente, no Brasil, à preservação ambiental, os resultados obtidos podem constituir um incentivo á continuidade das pesquisas. As sugestões para prosseguir essa pesquisa estão assinaladas a seguir:

- Criar modelos computacionais para avaliar a distribuição do nível de pressão sonora através de simulações de telhados verdes em diferentes situações urbanas;
- Avaliar acusticamente outros tipos de telhados verdes encontrados no Brasil;
- Avaliar a perda de transmissão sonora de telhados verdes encontrados no Brasil;
- Caracterizar parâmetros físico-químicos e mecânicos de telhados verdes brasileiros para comparação com características acústicas;
- Avaliar a capacidade de telhados verdes no incentivo de estimular a conexão humana com a natureza através de paisagens sonoras.

Desse modo, alterações provocadas pelo resultado desses estudos podem ajudar a impactar de modo positivo o ecossistema, de modo a evitar seu desequilíbrio e a propiciar para as populações, especialmente a brasileira, qualidade de vida condizente com o avanço da ciência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.

NBR 10151. Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas Visando o Conforto da Comunidade- Procedimento. Rio de Janeiro. 2000. 11p.

ALMEIDA, M. A. M. de. **Coberturas naturadas e qualidade ambiental:** uma contribuição em clima tropical úmido. 2008. 152f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://teses2.ufrj.br/Teses/FAU_M/MarcoAntonioMilazzoDeAlmeida.pdf>. Acesso em: 20 de dez. 2012.

ARARAQUARA. Câmara de Vereadores. **Decreto Municipal nº. 9.341, de 13 de janeiro de 2010.** Regulamenta a Lei Municipal nº. 7.152, de 08 de dezembro de 2009, que concede isenção parcial de Imposto Predial e Territorial Urbano para propriedades que conservarem área arborizada – IPTU VERDE, 2010.

ATV BRASIL-ASSOCIAÇÃO TELHADO VERDE BRASIL. **“IPTU Verde”, o que é?**, 2011. Disponível em: <<http://www.atvbrasil.com.br/pa.asp?catego=1>> Acesso em: 23 dez.2012.

BERANEK, L. L. **Musica acoustics and achitecture.** s.l.: John Wiley and Sons, 1962.

BERNDTSSON J. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review. **Ecological Engineering**, v.36, p.351-360. Abril. 2010

BISTAFA, S. R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído.** 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

BRASIL. Lei n. 10257, de 10 de julho de 2001. Estatuto da Cidade. **Presidência da República Federativa do Brasil - Casa Civil**, Brasília, DF, 11 jul. 2001. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110257.htm>. Acesso em: 24 jun.2012.

BRENNEISEN, S. Space for Urban Wildlife: Designing Green Roofs as Habitats in Switzerland. **Urban Habitats**, v.4, p. 27-36. Dec.2006

BRÜEL & KJAER. **Technical Documentation**. Hand-held Analyzers Types 2250 and 2270. User Manual. Denmark: Brüel & Kjaer Sound & Vibration Measurement A/S, 2012. 300 p.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Projeto de Lei nº1562 de 9 de junho de 2011**. Disponível em:<<http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=508497>>. Acesso em: 26 dez. 2012. a.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Projeto de Lei nº1703 de 29 de junho de 2011**. Disponível em:<<http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=510512>>. Acesso em: 26 dez. 2012.b.

CAETANO, F. D. N; TIBIRIÇÁ, A. C.G; SANTOS, G. L. A. A. Sistema de cobertura verde para uma edificação na área da saúde numa IFES. **XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Canela, out. 2010.

COLETIVO VERDE. **IPTU Verde ajuda na economia financeira e na sustentabilidade ambiental**, Set, 2012. Disponível em:<<http://www.coletivoverde.com.br/iptu-verde-ajuda-na-economia-financeira-e-na-sustentabilidade-ambiental/>> Acesso em: 23 dez.2012.

CONNELLY, M.; HODGSON, M. **Sound transmission loss of green roofs**. Sixth Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities - Conference, Awards and Trade Show, Baltimore, may. 2008.

CONNELLY, M. R.. **Acoustical characteristics of vegetated roofs**: contributions to the ecological performance of buildings and the urban soundscape. 2011. 218f. Thesis (Doctor of Philosophy) – The University of British Columbia. Vancouver, 2011.

CONAMA- CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (Brasil). *Câmara Técnica de Assuntos Jurídicos*. Resolução n. 01, de 8 de março de 1990. Dispõe sobre critérios de padrões de emissão de ruídos decorrentes de quaisquer atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, inclusive as de propaganda política. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 8 abr. 1990. Seção 1, p. 6408

CRUZ, J. ; ZANIN, N. **O Plano das Ideias na Arquitetura**: Concursos de Ideias. 1. ed. Porto Alegre: Pragmatha, 2010.

CURITIBA. Câmara de Vereadores. **Lei Municipal nº. 9.806, de 03 de janeiro de 2000**. Institui o Código Florestal do Município de Curitiba, e dá outras providências.

DIAS, G. F. **Pegada Ecológica e Sustentabilidade Humana**. São Paulo: Gaia, 2002, 264p.

ECOTELHADO. **Manual e especificações do sistema hexa ecotelhado**. Porto Alegre, ECOTELHADO, 2010.a. Disponível em: <<http://www.ecotelhado.com.br/Por/ecotelhado/SistemaHexa/default.aspx>>. Acesso em: 15 dez. 2012.

ECOTELHADO. **Sistema Alveolar Leve Ecotelhado com membrana dupla com vegetação rústica**. Porto Alegre, ECOTELHADO, 2010.b. Disponível em: <<http://www.ecotelhado.com.br/Por/ecotelhado/SistemaAlveolar/default.aspx>>. Acesso em: 15 dez. 2012.

FENG C.; MENG Q.; ZHANG Y. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. **Energy and Buildings** v.42, p. 959-965. 2010.

GETTER, K. et al. Carbon sequestration potential of extensive green roofs. **Environmental Science & Technology**, v.43, n.19, p.7564-7570, Ago.2009

GRANT, G. et al. **Green Roofs: Their existing status and potential for conserving biodiversity in urban areas**. Report Number 498, English Nature, Northminster House, Peterborough PE1 1UA, England. 2003. Disponível em:<<http://www.greenspec.co.uk/files/materials/greenroofs/EnglishNatureGreenroofs.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2012.

GBC BRASIL. GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL. Disponível em: <<http://www.gbcbrasil.org.br/>> Acesso em: 23 dez. 2012.

GREENROOFS. Industry support. 2011. Disponível em: http://www.greenroofs.com/Greenroofs101/industry_support.htm. Acesso em: 16 jun. 2012.

HOROSHENKOV, K; MOHAMED, M. Experimental investigation of the effects of water saturation on the acoustic admittance of sandy soils. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.120, p.1910 -1921. Out.2006

HUNTER, L. The healthy home. New York: Pocket Books, 1999. International Council for Building Research Studies and Documentation (CIB). **Agenda 21 on sustainable construction**. Rotterdam: CIB, 1999. Report Publication 237.

IGRA. INTERNATIONAL GREEN ROOF ASSOCIATION. Disponível em: < www.igra-world.com>. Acesso em: 10 out. 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 354** - Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room, 2003.

_____. **ISO 9613**. Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors - Parte 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere. 1993.

KANG, J. **Urban Sound Environment**. 1.ed. Oxfordshire: Taylor & Francis, 2006.

KINSLER, L. et al . **Fundamentals of Acoustics**, third edition, John Wiley & Sons, New York, 1980.

LAGSTRÖM, J. **Do Extensive Green Roofs Reduce Noise?** Examination Project Environmental Science Spring. Malmö: IGRA, n.010, 2004.

LAWLOR, G. et al. **GREEN ROOFS -A Resource Manual for Municipal Policy Makers**. Canada: CMHC-Home to Canadians, 2006.
Disponível em: <http://www.cmhc-schl.gc.ca/odpub/pdf/65255.pdf>. Acesso em: 27 dez.2012

LINSKENS, H. F et al. The acoustic climate of plant communities. **Oecologia**, v.23 (3), p.165-177. Set. 1976.

LIVRO VERDE DA COMISSÃO EUROPEIA. **Futura Política de Ruído**, Comissão das Comunidades Europeias, COM, (96), 1996.

LONG, M. **Architectural Acoustics**. California: Elsevier Academic Press, 2006 .

LORENZI, H.; SOUZA, H. M. **Plantas Ornamentais no Brasil: arbustivas, herbáceas e trepadeiras**. 3ª edição. São Paulo. Instituto Plantarum de estudos da flora LTDA, 2001.

MINKE, G. **Techos verdes: planificación, ejecución, consejos prácticos**. Editorial Fin de Siglo, Montevideo, Uruguai, 2004 Disponível em: <http://ecocosas.com/wp-content/uploads/Biblioteca/Arquitectura/TechosVerdes_Pantalla.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2013.

OBERNDORFER, E. et al. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. **BioScience**, v.57 (10), 823–833. 2007.

PAIXÃO, D. X. da. **Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria, utilizando análise estatística de energia(SEA)**. 2002. 161p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

PAUL, S. Som e ruído- Releituras críticas de textos brasileiros. XXIII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, Salvador, maio. 2010.

RIO GRANDE DO SUL. Lei n. 11.520, de 3 de agosto de 2000. Código Estadual do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul. **Ministério Público do Estado do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, RS, 4 ago. 2000. Disponível em: < <http://www.mp.rs.gov.br/ambiente/legislacao/id628.htm>>. Acesso em: 24 jun. 2012.

ROLA, S. M. **A natureza como ferramenta para a sustentabilidade de cidades: Estudo da capacidade do sistema de natureza em filtrar a água de chuva**. 2008. 222f. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, abril. 2008.

SANTA CATARINA. Lei nº 14.243, de 11 de dezembro de 2007. **Programa Estadual de Incentivo à Adoção de “Telhados Verdes”**. Florianópolis, SC, 12 dez. 2007. Disponível em: < <http://www.rcambiental.com.br/Atos/ver/LEI-SC-14243-2007>>. Acesso em: 24 mar. 2012.

SANTAMOURIS, M. et al. Investigating and analysing the energy and environmental performance of na experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece. **Energy**, v.32, p. 1781-1788, set. 2007.

SILVA, A. R.. **Minimização do fluxo de potência através do tubo de descarga de compressores herméticos**. 2004. 121p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SILVA, D. T. et al. Ecotelhado: uma medida sustentável. In: 25ª JORNADA ACADÊMICA INTEGRADA - UFSM, 1041230986 , 2010, Santa Maria. **Anais eletrônicos...** Santa Maria: UFSM,2010.Disponívelem:<http://portal.ufsm.br/jai2010/anais/trabalhos/trabalho_1041230986.htm>. Acesso em: 21 jan. 2012.

SMYRNOVA, Y. et al. Laboratory Test of Sound Absorption of Vegetation. In: 1st EUROREGIO - CONGRESS ON SOUND AND VIBRATION, 262. , 2010, Ljubljana. Disponível em: <<http://www.greenroofresearch.co.uk/acoustic/EuroRegio-262.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2012.

TAHA, H. Modeling impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the South Coast Air Basin, **Atmospheric Environment** v.30, p. 3423–3430. 1996.

TORONTO. TORONTO MUNICIPAL CODE. CHAPTER 492, GREEN ROOFS.

Disponível em: <http://www.toronto.ca/legdocs/municode/1184_492.pdf>. Acesso em: 22.dez.2012.

TORONTO. MAKING GREEN ROOFS HAPPEN - Section TWO. **Learning from International Leaders in green roof policy**. Nov, 2005. 149p. Disponível em:<http://www.toronto.ca/greenroofs/pdf/makingsection2_nov16.pdf>. Acesso em: 24 dez.2012

VAN RENTERGHEM, T.; BOTTELDOOREN, D. Numerical evaluation of sound propagating over green roofs. **Journal of Sound and Vibration** , v.317, 781–799, nov. 2008.

VAN RENTERGHEM, T.; BOTTELDOOREN, D. Reducing the acoustical façade load from Road traffic with Green roofs. **Building and Environment**, v.44, 1081-1087, maio. 2009.

VAN RENTERGHEM, T.; BOTTELDOOREN, D. In-situ measurements of sound propagating over extensive green roofs. **Building and Environment**, v.46, 729-738, março. 2011.

VERGARA, L.G.L.; PIPPI, L.G.A.; BARBOSA, A.R. Aplicação de telhado verde como tecnologia sustentável para o projeto de edificações residenciais. **X Encontro Nacional e VII Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído**, Natal, set. 2009.

VILA VELHA. Câmara de Vereadores. **Decreto Municipal nº. 229, de 25 de maio de 2009**. Cria comissão interna para avaliação, desapropriação e fiscalização de obras e serviços públicos.

WHALLEY, J. M. The Landscape of the Roof. **Landscape Design**, v.5, p.7-8. 1978

WHO. **Guidelines for Community Noise**, Edited by Birgitta Berglund, World Health, 1999. Disponível em <<http://whqlibdoc.who.int/hq/1999/a68672.pdf>> Acesso em: 3 jan. 2013.

_____. **Environmental health indicators for Europe: A pilot indicator-based report**, 2004. Disponível em http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0003/140925/E82938.pdf Acesso em: 3 jan. 2013.

WONG, N. H. et al. Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. **Building and Environment**, v. 45, p. 411-420, fev. 2010.


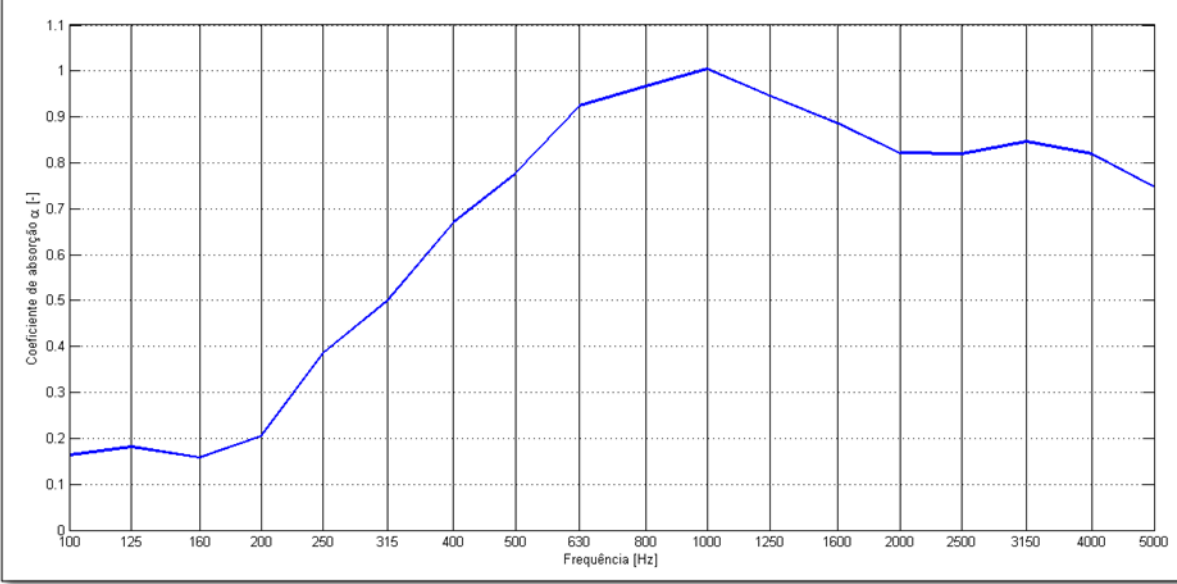
YANG, J.; YU, Q. ; GONG, P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. **Atmospheric Environment**, v. 40, p.7266-7273, 2008.

YANG, H.; CHOI, M.; KANG, J. Acoustic effects of designable factors for the application of green roof systems on street-level low-profiled structures. In: 1st EUROREGIO - CONGRESS ON SOUND AND VIBRATION, 160. , 2010, Ljubljana. Disponível em: <<http://www.greenroofresearch.co.uk/acoustic/EAA-EUROREGIO-160.pdf> >. Acesso em: 21 jun. 2012.


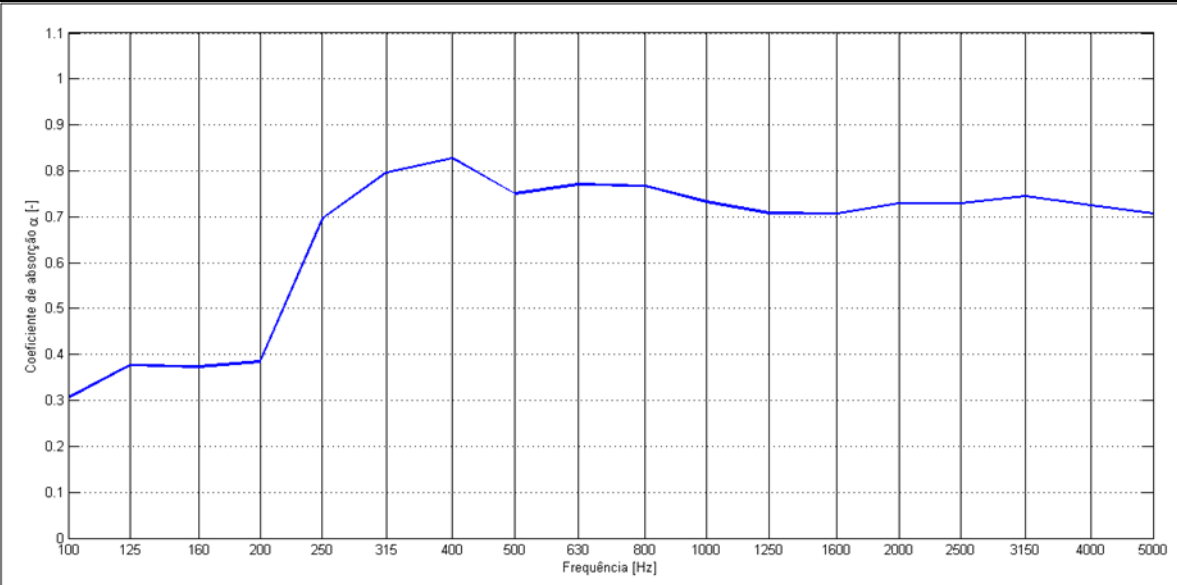
YANG, H.S.; KANG, J. ; CHOI, M,S. Acoustic effects of Green roof systems on a low-profiled structure at street level. **Building and Environment**, v. 50, p.44-55. 2012.

APÊNDICES


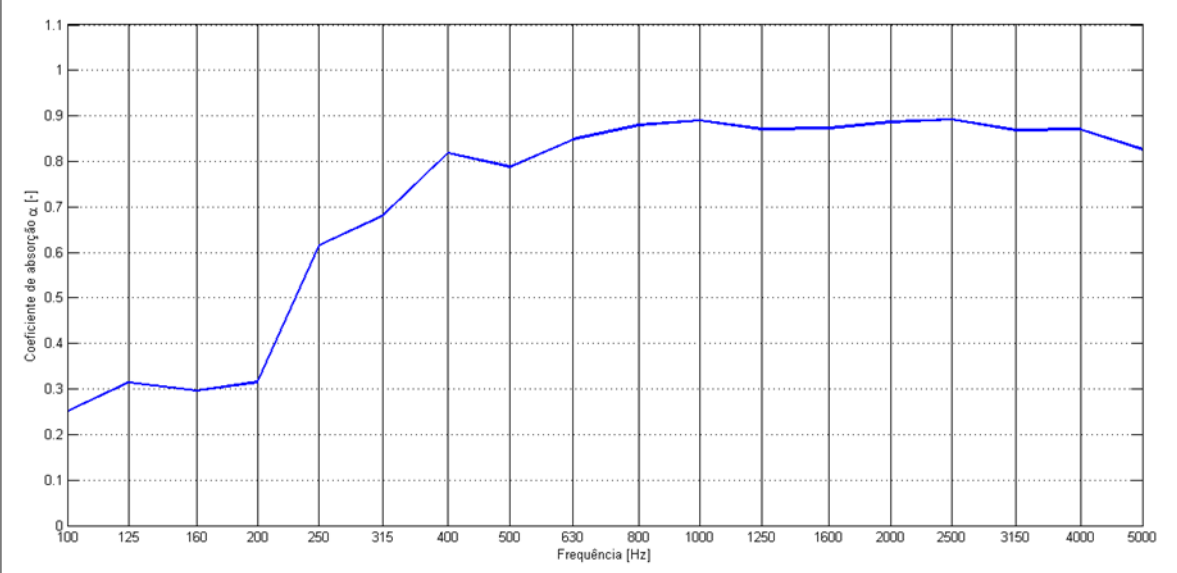
Apêndice A- Relatório de ensaio acústico - Experimento 01

Laboratório de Engenharia Acústica - LEAC-UFSM Determinação do coeficiente de absorção sonora – α Experimento 01																		
Norma: ISO 354							Data: set-2013											
Descrição: Ensaio de absorção de sistema modular de telhado verde- alveolar com 2,5cm de substrato. Espessura da amostra: 5,82 cm Dimensão da Amostra: 11,66m ² Equipamento: MNPS 2270																		
Características da Câmara Reverberante																		
Comprimento médio (m): 7,78						Altura média (m): 4,66						Temperatura do ar (°C): 16,9						
Largura média (m): 5,68						Volume (m ³): 207						Umidade Relativa do ar (%): 77						
Gráfico- Coeficiente de Absorção Sonora (α)																		
																		
Espessura: 5,82cm																		
Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
T20 câm.	17,81	16,17	18,67	17,14	16,2	16,86	15,34	14,99	14,38	13,31	11,46	9,92	9,01	7,78	6,41	5,08	3,93	3,10
T30 câm	17,47	17,67	19,39	17,75	16,4	17,1	15,33	15,25	14,4	13,2	11,43	9,86	9,01	7,75	6,43	5,14	3,93	3,14
T20 amost.	7,65	7,56	8,02	7,59	4,86	4,13	3,08	2,7	2,32	2,27	2,14	2,18	2,27	2,33	2,18	2,02	1,91	1,75
T30 amost	8,15	7,96	8,72	7,70	5,01	4,19	3,28	2,88	2,47	2,36	2,23	2,26	2,33	2,37	2,25	2,05	1,90	1,77
α	0,16	0,18	0,16	0,21	0,39	0,5	0,67	0,78	0,92	0,97	1,0	0,95	0,89	0,82	0,82	0,85	0,82	0,75


Apêndice B- Relatório de ensaio acústico - Experimento 02

Laboratório de Engenharia Acústica - LEAC-UFSM																		
Determinação do coeficiente de absorção sonora – α Experimento 02																		
Norma: ISO 354									Data: set-2013									
Descrição: Ensaio de absorção de sistema modular de telhado verde- alveolar com grama Espessura da amostra: 9,82 cm Dimensão da Amostra: 11,66m ² Equipamento: MNPS 2270																		
Características da Câmara Reverberante																		
Comprimento médio (m): 7,78						Altura média (m): 4,66						Temperatura do ar (°C): 16,9						
Largura média (m): 5,68						Volume (m ³): 207						Umidade Relativa do ar (%): 73						
Gráfico- Coeficiente de Absorção Sonora (α)																		
																		
Espessura: 9,82cm																		
Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25 k	1,6k	2k	2,5k	3,15 k	4k	5k
T20 câm.	17,8	16,17	18,67	17,14	16,2	16,8	15,3	14,9	14,3	13,3	11,46	9,92	9,01	7,78	6,41	5,08	3,93	3,10
T30 Câm.	17,4	17,67	19,39	17,75	16,4	17,1	15,3	15,2	14,4	13,2	11,43	9,86	9,01	7,75	6,43	5,14	3,93	3,14
T20 amost.	5,59	5,02	4,65	4,90	2,93	2,72	2,56	2,71	2,85	2,79	2,86	2,85	2,75	2,56	2,47	2,22	2,01	1,80
T30 amost.	5,76	5,12	5,21	5,15	3,22	2,90	2,77	2,96	2,86	2,84	2,85	2,80	2,74	2,57	2,42	2,20	2,01	1,79
α	0,31	0,38	0,37	0,38	0,70	0,80	0,83	0,75	0,77	0,77	0,73	0,71	0,71	0,73	0,73	0,74	0,73	0,71

Apêndice C- Relatório de ensaio acústico - Experimento 03

Laboratório de Engenharia Acústica - LEAC-UFSM																		
Determinação do coeficiente de absorção sonora – α																		
Norma: ISO 354										Data: out-2013								
Descrição: Ensaio de absorção de sistema modular de telhado verde- alveolar com 4 cm de substrato Espessura da amostra: 7,32 cm Dimensão da Amostra: 11,66m ² Equipamento: MNPS 2270																		
Características da Câmara Reverberante																		
Comprimento médio (m): 7,78						Altura média (m): 4,66						Temperatura do ar (°C): 17,3						
Largura média (m): 5,68						Volume (m ³): 207						Umidade Relativa do ar (%): 74						
Gráfico- Coeficiente de Absorção Sonora (α)																		
																		
Espessura: 7,32cm																		
Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25 k	1,6k	2k	2,5k	3,15 k	4k	5k
T20 câm.	17,8 1	16,17	18,67	17,14	16,2	16,8 6	15,3 4	14,9 9	14,3 8	13,3 1	11,46	9,92	9,01	7,78	6,41	5,08	3,93	3,10
T30 câm.	17,4 7	17,67	19,39	17,75	16,4	17,1	15,3 3	15,2 5	14,4	13,2	11,43	9,86	9,01	7,75	6,43	5,14	3,93	3,14
T20 amost.	6,59	5,65	5,99	5,80	3,27	3,11	2,73	2,54	2,58	2,47	2,47	2,40	2,35	2,23	2,11	2,02	1,83	1,70
T30 amost.	6,49	5,78	6,08	5,90	3,54	3,29	2,79	2,84	2,64	2,54	2,45	2,40	2,35	2,24	2,12	2,01	1,83	1,68
α	0,25	0,31	0,30	0,32	0,62	0,68	0,82	0,79	0,85	0,88	0,89	0,87	0,87	0,89	0,89	0,87	0,87	0,82

Apêndice D- Relatório de ensaio acústico - Experimento 04

Laboratório de Engenharia Acústica - LEAC-UFSM Determinação do coeficiente de absorção sonora – α Experimento 04	
---	---

Norma: ISO 354

Data: out-2013

Descrição: Ensaio de absorção de sistema modular de telhado verde- hexa com 4 cm de substrato

Espessura da amostra: 7,02 cm

Dimensão da Amostra: 11,66m²

Equipamento: MNPS 2270

Características da Câmara Reverberante

Comprimento médio (m): 7,78

Altura média (m): 4,66

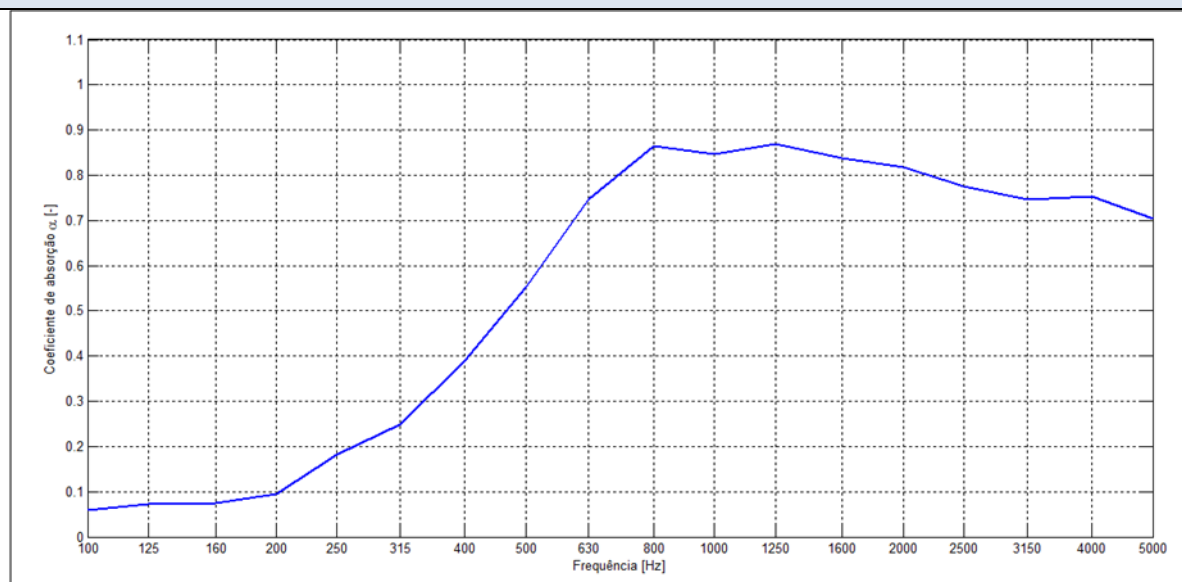
Temperatura do ar (°C): 17,4

Largura média (m): 5,68

Volume (m³): 207

Umidade Relativa do ar (%): 64


Gráfico- Coeficiente de Absorção Sonora (α)



Espessura: 7,02 cm

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
T20 câm. 1	17,8	16,17	18,67	17,14	16,2	16,86	15,34	14,99	14,38	13,31	11,46	9,92	9,01	7,78	6,41	5,08	3,93	3,10
T30 câm. 7	17,4	17,67	19,39	17,75	16,4	17,1	15,33	15,25	14,4	13,2	11,43	9,86	9,01	7,75	6,43	5,14	3,93	3,14
T20 amost. 4	12,0	10,82	11,18	10,62	7,62	6,59	4,62	3,67	2,71	2,53	2,50	2,35	2,40	2,28	2,30	2,14	1,91	1,72
T30 amost. 5	11,6	11,56	11,73	11,03	7,84	6,70	4,88	3,74	2,93	2,58	2,55	2,41	2,42	2,36	2,30	2,16	1,92	1,73
α	0,06	0,07	0,07	0,09	0,18	0,25	0,39	0,55	0,75	0,87	0,85	0,87	0,84	0,82	0,78	0,75	0,75	0,70

Apêndice E- Relatório de ensaio acústico - Experimento 05

Laboratório de Engenharia Acústica - LEAC-UFSM Determinação do coeficiente de absorção sonora – α Experimento 05	
---	---

Norma: ISO 354

Data: out-2013

Descrição: Ensaio de absorção de sistema modular de telhado verde- hexa com 6 cm de substrato

Espessura da amostra: 7,02 cm

Dimensão da Amostra: 11,66m²

Equipamento: MNPS 2270

Características da Câmara Reverberante

Comprimento médio (m): 7,78

Altura média (m): 4,66

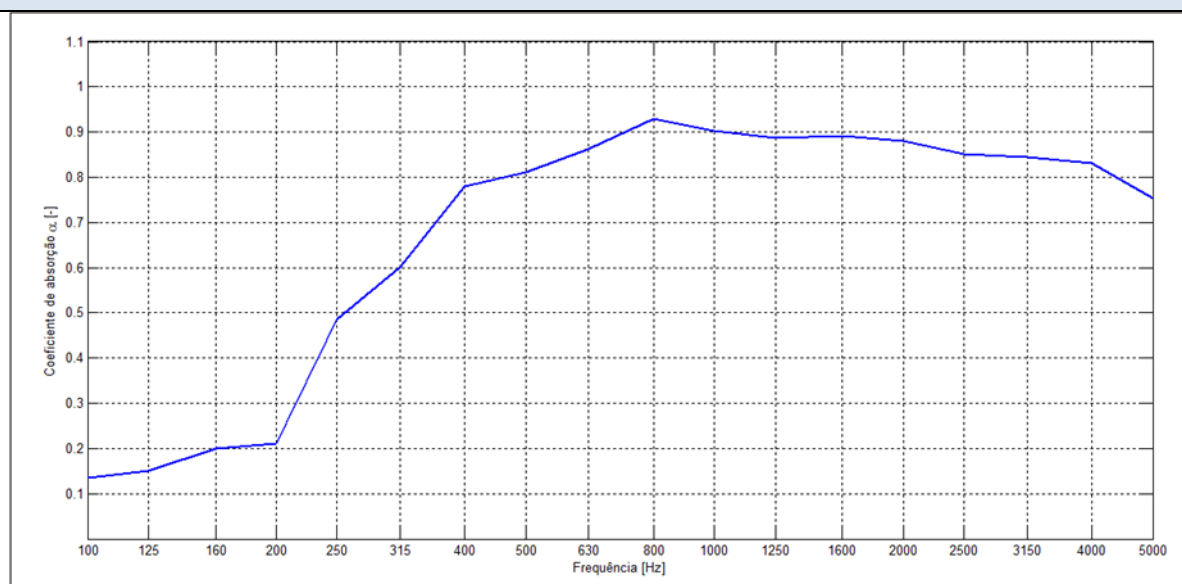
Temperatura do ar (°C): 17,4

Largura média (m): 5,68

Volume (m³): 207

Umidade Relativa do ar (%): 62


Gráfico- Coeficiente de Absorção Sonora (α)



Espessura: 7,02cm

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25k	1,6k	2k	2,5k	3,15k	4k	5k
T20 câm.	17,8 1	16,17	18,67	17,14	16,2	16,8 6	15,3 4	14,9 9	14,3 8	13,3 1	11,46	9,92	9,01	7,78	6,41	5,08	3,93	3,10
T30 câm.	17,4 7	17,67	19,39	17,75	16,4	17,1	15,3 3	15,2 5	14,4	13,2	11,43	9,86	9,01	7,75	6,43	5,14	3,93	3,14
T20 amost.	8,75	8,11	7,23	7,10	4,00	3,41	2,69	2,65	2,45	2,47	2,38	2,30	2,28	2,24	2,11	1,98	1,80	1,63
T30 amost.	8,84	8,73	7,69	7,56	4,24	3,63	2,90	2,78	2,61	2,44	2,43	2,37	2,31	2,24	2,16	2,00	1,81	1,66
α	0,14	0,15	0,20	0,21	0,49	0,60	0,78	0,81	0,86	0,93	0,90	0,89	0,89	0,88	0,85	0,84	0,83	0,75

Apêndice F- Relatório de ensaio acústico - Experimento 06

Laboratório de Engenharia Acústica - LEAC-UFSM																		
Determinação do coeficiente de absorção sonora – α Experimento 06																		
Norma: ISO 354								Data: out-2013										
Descrição: Ensaio de absorção de sistema modular de telhado verde- hexa com <i>sedum</i> Espessura da amostra: 15,02 cm Dimensão da Amostra: 11,66m ² Equipamento: MNPS 2270																		
Características da Câmara Reverberante																		
Comprimento médio (m): 7,78					Altura média (m): 4,66					Temperatura do ar (°C): 17,9								
Largura média (m): 5,68					Volume (m ³): 207					Umidade Relativa do ar (%): 74								
Gráfico- Coeficiente de Absorção Sonora (α)																		
																		
Espessura: 15,02cm																		
Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1,25 k	1,6k	2k	2,5k	3,15 k	4k	5k
T20 câm.	17,81	16,17	18,67	17,14	16,2	16,86	15,34	14,99	14,38	13,31	11,46	9,92	9,01	7,78	6,41	5,08	3,93	3,10
T30 câm.	17,47	17,67	19,39	17,75	16,4	17,1	15,33	15,25	14,4	13,2	11,43	9,86	9,01	7,75	6,43	5,14	3,93	3,14
T20 amost.	8,14	6,47	5,99	6,35	3,52	3,11	2,60	2,56	2,40	2,42	2,38	2,32	2,33	2,25	2,14	2,02	1,80	1,61
T30 amost.	8,15	6,94	6,62	6,70	3,73	3,27	2,75	2,69	2,52	2,40	2,38	2,32	2,31	2,23	2,11	1,99	1,80	1,63
α	0,16	0,23	0,26	0,26	0,58	0,69	0,83	0,84	0,90	0,94	0,92	0,91	0,89	0,89	0,90	0,88	0,90	0,88

ANEXOS

Anexo A - Plantas resistentes à secas

Plantas Resistentes a Secas		
Suculentas:		Liliáceas:
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Sedum acre</i> • <i>Sedum álbum</i> • <i>Sedum anacampseros</i> • <i>Sedum caudicola</i> • <i>Sedum cyaneum</i> • <i>Sedum ewersii</i> • <i>Sedum floriferum</i> • <i>Sedum hispanicum</i> • <i>Sedum hybridum</i> • <i>Sedum kamtschaticum</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Sedum krajiniae</i> • <i>Sedum lydium</i> • <i>Sedum reflexum</i> • <i>Sedum selskianum</i> • <i>Sedum sexangulare</i> • <i>Sedum spurium</i> • <i>Sempervivella sedoides</i> • <i>Sempervivum arachnoideum</i> • <i>Sempervivum montanum</i> • <i>Sempervivum tectorum</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Allium atropurpureum</i> • <i>Allium flavum var. minus</i> • <i>Allium montanum</i> • <i>Allium oreophilum</i> • <i>Allium schoenoprasum</i>
		Gramíneas:
		<ul style="list-style-type: none"> • <i>Bromus tectorum</i> • <i>Carex humilis</i> • <i>Carex ornithopoda</i> • <i>Festuca punctoria</i>

Fonte: Elaborado a partir de Minke, 2004.

Anexo B - Nível de critério de avaliação NCA para ambientes externos, em dB(A)

Tipos de áreas	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

Fonte: NBR 10151 (ABNT, 2000).