



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

A utilização da cortiça associada a espumas acústicas para absorção sonora

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Território e Gestão do Ambiente

Autor

Cátia Micaela Antunes Marques

Orientador

Julieta Maria Pires António (DEC-FCTUC)

António José Barreto Tadeu (DEC-FCTUC)

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada.

Colaboração institucional



ITeCons

Instituto de Investigação e Desenvolvimento
Tecnológico em Ciências da Construção

Coimbra, Julho, 2014

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, pela disponibilidade e interesse manifestados para colaborar e orientar esta dissertação e por todo o apoio, sugestões e esclarecimentos prestados durante a elaboração deste trabalho.

À empresa Log(Acústica), Consultores Associados, Lda pela possibilidade de participar neste trabalho de desenvolvimento de soluções de absorção sonora.

Aos Engenheiros Ana Neves e José Nascimento do ITeCons por se mostrarem disponíveis a colaborar na realização dos ensaios, mostrando sempre preocupação em justificar todos os procedimentos adotados.

À minha família, principalmente aos meus pais por me transmitirem valores durante o meu crescimento que serão indispensáveis em qualquer situação da minha vida. Por todo o apoio demonstrado e por sempre me proporcionarem oportunidades de lazer, mas sobretudo de aprendizagem.

A todos os meus amigos, pela paciência e companheirismo demonstrados ao longo desta etapa. Agradeço cada minuto compartilhado, cada sorriso, cada gargalhada, cada momento único e especial que guardarei com saudade, porque foram essenciais para o meu sucesso académico e porque o serão na minha vida futura.

RESUMO

A escolha de materiais mais ecológicos para serem utilizados na construção de edifícios tem aumentado no sentido de acompanhar exigências de sustentabilidade. Um dos materiais que se enquadra nesta fileira é a cortiça.

O aglomerado de cortiça expandida, ICB, descrito como aglomerado puro é um produto natural, 100% vegetal, que provém da cortiça extraída das operações de limpeza e manutenção dos sobreiros. Este material tem várias propriedades conhecidas, como seja o seu isolamento térmico e a capacidade de atenuar vibrações. Devido à sua porosidade tem algumas propriedades de absorção sonora. No entanto, a sua absorção é limitada a uma determinada gama de frequências. Para alargar a gama de frequências onde o material é eficiente, o aglomerado negro de cortiça pode ser combinado com outros materiais, como por exemplo espumas acústicas, utilizando perfurações na cortiça com diferentes geometrias.

Assim, neste estudo pretende-se efetuar a caracterização da absorção sonora da cortiça combinada com espumas absorventes. Para o efeito selecionaram-se quatro espumas e um tecido espumoso. Inicialmente determinou-se a absorção sonora das espumas e do tecido isoladamente para se escolherem duas das melhores espumas. Posteriormente caracterizou-se a absorção sonora de painéis de cortiça não perfurada e de cortiça perfurada para servirem de referência.

Depois, as duas espumas selecionadas e o tecido espumoso foram combinados com painéis de cortiça expandida perfurados para determinar os coeficientes de absorção sonora correspondentes. As duas soluções finais testadas são compostas por cada uma das espumas selecionadas, tecido espumoso e aglomerado de cortiça expandida perfurado. Estas combinações apresentaram melhores resultados que o aglomerado de cortiça expandida não perfurado isoladamente.

ABSTRACT

The choice of more environmentally friendly materials for use in building construction has increased in order to follow sustainability requirements. One of the materials that meets those requirements is cork.

The expanded cork agglomerate, ICB, is described as a pure cluster, is a natural product, 100% vegetable that comes from cork extracted from the cleaning and maintenance operations of the cork tree. This material has a number of known properties, such as thermal insulation and has a capacity to attenuate vibrations. Due to its porosity has some sound absorption properties. However the cork's sound absorption is limited to a certain range of frequencies. To extend the range of frequencies where the material is efficient, the expanded cork agglomerate can be combined with other materials, such as acoustic foams, using perforations in cork with different geometries.

Thus, this study aims to characterize the sound absorption of cork combined with absorbent foams. For this purpose four foams were selected and a foamized fabric. Initially, the sound absorption of the four foams and the fabric were characterized in order to select two of the best performance foams. Then, non-perforated and perforated cork boards were tested to obtain their sound absorption coefficient to be used as reference.

Afterwards the two selected foams and the fabric were associated with the perforated expanded cork agglomerate boards and tested to find the sound absorption coefficients. The two final solutions tested are composed by each one of the foams, the foamized fabric and the perforated expanded cork agglomerate. The combination of the perforated expanded cork agglomerate with the foamized fabric and the foams presents a better sound absorption than the non-perforated expanded cork agglomerate alone.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	ix
SIMBOLOGIA	x
ABREVIATURAS E SIGLAS	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento e Motivação	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estrutura do documento	3
2. ABSORÇÃO DO SOM.....	5
2.1. Absorção sonora	5
2.1.1. Controlo de reverberação.....	6
2.1.2. Inteligibilidade.....	7
2.2. Sistemas Absorventes	8
2.2.1. Materiais porosos ou fibrosos.....	9
2.2.1.1. Lãs minerais	10
2.2.1.2. Massas porosas	13
2.2.1.3. Espumas acústicas.....	13
2.2.1.4. Alcatifas e tecidos	14
2.2.1.5. Gesso acústico.....	15
2.2.1.6. Materiais sustentáveis	17
2.2.2. Sistemas Ressonantes	22
2.2.2.1. Ressonadores de cavidade	22
2.2.2.2. Membranas ressonantes	24
2.2.3. Dispositivos de acústica variável.....	25
2.2.3.1. Elementos físicos variáveis.....	25
2.2.3.2. Sistemas eletroacústicos	26
2.3. Métodos para determinação da absorção sonora em laboratório e in situ	28
2.3.1. Método do tubo de ondas estacionárias.....	28

2.3.2.	Método da câmara reverberante	30
2.3.3.	Ensaios in situ	32
3.	MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODO	35
3.1.	Descrição da câmara reverberante	35
3.2.	Descrição das amostras	37
3.3.	Descrição do equipamento	40
3.4.	Condições ambientais	41
3.5.	Descrição do método	42
3.5.1.	Montagem do provete	42
3.5.2.	Medição do tempo de reverberação	43
3.5.2.1.	Verificações preliminares	43
3.5.2.2	Posições do microfone e da fonte	43
3.5.2.3.	Produção de campo sonoro	44
4.	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO	46
4.1.	Cálculo e expressão dos resultados do coeficiente de absorção sonora, α_s	46
4.1.1.	Avaliação do tempo de reverberação baseada em curvas de decaimento	46
4.1.2.	Cálculo dos tempos de reverberação T_1 e T_2	46
4.1.3.	Cálculo de A_1 , A_2 e AT	46
4.1.4.	Cálculo de α_s	48
4.2.	Cálculo e expressão dos resultados do coeficiente de absorção sonora ponderado, α_w 48	
4.2.1.	Cálculo de α_{pi}	49
4.2.2.	Cálculo de α_w	49
4.3.	Cálculo e expressão dos resultados do coeficiente de redução de ruído, NRC	50
4.4.	Resultados	51
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	62
5.1.	Conclusões	62
5.2.	Trabalhos Futuros	63
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
	ANEXO A – RESULTADOS DOS ENSAIOS LABORATORIAIS	A

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Tempos de reverberação aconselhados em função do volume do recinto (f=500Hz) (Ferreira, 2010)	6
Figura 2.2- Sobreposição de sons com diferentes atrasos e impressão subjetiva associada (Isbert, 1998).	8
Figura 2.3- Coeficientes de absorção sonora, α , de uma solução mista (Tadeu et al, 2007)	9
Figura 2.4- Estrutura de materiais porosos e fibrosos respetivamente (LABCON@, 2014)	10
Figura 2.5- Baffles acústicos suspensos (AKUSTIKE@, 2014)	11
Figura 2.6- Manta de lã de vidro e placa de lã de rocha respetivamente (ARCHIPRODUCTS@, 2014 e FRASMIL@, 2014)	12
Figura 2.7- Coeficientes de absorção sonora dos materiais lã de rocha e lã de vidro com 10 cm de espessura (adaptado de Jadir e Lima, 2009)	12
Figura 2.8- Exemplos de coeficientes de absorção sonora para massa porosa projetada aplicada sobre uma superfície rígida em diversas espessuras (adaptado de Ferreira, 2010).	13
Figura 2.9- Aglomerado de espuma de poliuretano (EMBALAPLAST@, 2014)	14
Figura 2.10- Coeficientes de absorção sonora de uma espuma de poliuretano com 2,5 cm de espessura	14
Figura 2.11- Valores do coeficiente de absorção sonora de uma alcatifa sobre uma laje de betão armado (Rodrigues, 2008)	15
Figura 2.12- Valores do coeficiente de absorção sonora de um reposteiro de algodão com diferentes percentagens de franzido (Domingues, 2005)	15
Figura 2.13- Coeficientes de absorção sonora do gesso acústico consoante a espessura e composição (BASWAPHON@2014)	17
Figura 2.14- Granulados de cortiça (JPSCORK@,2014)	18
Figura 2.15- Aglomerado de cortiça expandida (AMORIM@, 2014)	18
Figura 2.16- Absorção sonora de aglomerados negros e aglomerados compostos de cortiça (Domingues, 2005)	19
Figura 2.17- Fibras naturais de cana-de-açúcar (Putra et al, 2013)	20
Figura 2.18- Comparação do coeficiente de absorção sonora de fibras de cana-de-açúcar e um tecido (Putra et al, 2013)	20

Figura 2.19- Coeficientes de absorção sonora de uma placa composta por palha de arroz e resíduos de pneus em comparação com os de outros materiais de construção (Yang et al, 2004)	21
Figura 2.20-Esquema básico de um ressoador simples de cavidade (Helmholtz) montado numa parede (Isbert, 1998)	22
Figura 2.21-- Esquema básico de um ressoador múltiplo de cavidade (Helmholtz) à base de painéis perfurados ou estriados (Isbert, 1998)	23
Figura 2.22- Ressonadores à base de painéis perfurados e estriados	23
Figura 2.23- Blocos de betão com câmaras Helmholtz (ARCHIPRODUCTS@, 2014)	23
Figura 2.24- Coeficientes de absorção sonora para diferentes absorvedores de Helmholtz(Cox e D'Antonio, 2009):	24
Figura 2.25- Esquema básico de um ressoador de membrana (Isbert, 1998)	24
Figura 2.26- Características de absorção sonora de sistemas tipo membrana ressonante, com e sem preenchimento por material absorvente na caixa-de-ar (adaptado de Domingues, 2005)	25
Figura 2.27- Cadeiras móveis (Isbert, 1998):	26
Figura 2.28- Coeficiente de absorção sonora de cadeiras móveis vazias e ocupadas com diferentes percentagens de estofos (Isbert, 1998)	26
Figura 2.29- Esquema básico de um canal de um sistema de Ressonância Assistida (Isbert, 1998)	27
Figura 2.30- Tempos de reverberação do Royal Festival Hall de Londres (Grã Bretanha):	27
Figura 2.31- Construção e operação do tubo de impedância (adaptado de Everest e Pohlmann, 2009 e EN ISO 10534-1:1996)	29
Figura 2.32- Método do tubo de impedância usando dois microfones (EN ISO 10534-2:1998)	29
Figura 2.33-Instalação para a técnica de medição in situ equivalente à norma ISO 13472-1 (Londhe et al, 2009)	33
Figura 3.1-Esquema das dimensões da câmara reverberante utilizada nos ensaios	36
Figura 3.2- Difusores fixos, constituídos por painéis em policarbonato, dispostos no teto da câmara reverberante	36
Figura 3.3- Caixas-de-ressonância forradas com telas	36
Figura 3.4- Amostra E1	37
Figura 3.5- Amostra E2	37
Figura 3.6- Amostra E3	37
Figura 3.7- Amostra E4	37
Figura 3.8- Amostra E5	37

Figura 3.9- Amostra E6	38
Figura 3.10- Amostra E7	38
Figura 3.11- Amostra E8	38
Figura 3.12- Amostra E9	38
Figura 3.13- Amostra E10	39
Figura 3.14- Amostra E11	39
Figura 3.15- Amostra E12	39
Figura 3.16- Amostra E13	39
Figura 3.17- Amostra E14	39
Figura 3.18- Equalizador e Amplificador	40
Figura 3.19- Sistema de aquisição multianalisador Pulse	40
Figura 3.20- Termo-higrómetro	40
Figura 3.21- Fonte de ruídos aéreos	41
Figura 3.22- Microfone ½’’	41
Figura 3.23- Software usado para determinar as curvas de absorção sonora	41
Figura 3.24- Calibrador acústico	41
Figura 4.1- Curva de referência para avaliação do coeficiente de absorção ponderado, α_w (ISO 11654:1997 (E))	49
Figura 4.2- Resultados dos ensaios realizados na primeira fase (amostras E1, E2, E3, E4 e E5)	52
Figura 4.3- Resultados da combinação das amostras E1 e E2 (E6)	53
Figura 4.4- Resultados da combinação das amostras E1 e E3 (E7) - segunda fase	55
Figura 4.5- Comparação das duas melhores espumas acústicas após a sobreposição do tecido espumoso	56
Figura 4.6- Resultados dos ensaios E8 e E9	57
Figura 4.7- Resultados dos ensaios E9, E10, E11 e E12	58
Figura 4.8- Resultados comparativos das espumas com a cortiça perfurada e isoladamente (E2,E3,E11 e E12)	59
Figura 4.9- Resultados dos ensaios E9, E11, E12, E13 e E14	60
Figura 4.10- Painéis de cortiça com diferentes configurações de perfurações, esteticamente atraentes	61

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1- Vantagens e Desvantagens de sistemas eletroacústicos em relação a elementos físicos de acústica variável (Isbert, 1998)	28
Quadro 2.2-Vantagens e Desvantagens do Método do Tubo de ondas estacionárias	30
Quadro 2.3- Frequências centrais, em Hz, para as bandas de um terço de oitava (ISO 266)	32
Quadro 2.4-Vantagens e Desvantagens do Método da Câmara reverberante	32
Quadro 2.5- Vantagens e Desvantagens de Ensaios in situ	34
Quadro 3.1- Descrição das amostras	39
Quadro 3.2- Verificação das condições ambientais	41
Quadro 3.3- Verificação de forma das amostras	42
Quadro 4.1- Classes de absorção sonora	50
Quadro 4.2- Classes de absorção sonora das amostras ensaiadas (E1, E2, E3, E4 e E5)	52
Quadro 4.3- Valores de α_s das amostras ensaiadas E2 e E6	53
Quadro 4.4- Classes de absorção sonora das amostras ensaiadas (E1, E2 e E6)	54
Quadro 4.5- Valores de α_s das amostras ensaiadas E3 e E7	55
Quadro 4.6- Classes de absorção sonora das amostras ensaiadas (E1, E3 e E7)	56
Quadro 4.7- Classes de absorção sonora das amostras ensaiadas (E8 e E9)	57
Quadro 4.8- Classes de absorção sonora das amostras ensaiadas (E9, E10, E11 e E12)	59
Quadro 4.9- Classes de absorção sonora das amostras ensaiadas (E9, E11 e E12, E13 e E14)	60

SIMBOLOGIA

A_1 e A_2 - área de absorção sonora equivalente da câmara reverberante sem e com o provete respetivamente

A_T - área de absorção sonora equivalente do provete

$H_r(f)$ e $H_i(f)$ - espectros refletido e incidente respetivamente

$L_p(t)$ - nível de pressão sonora médio, no instante t

$L_{pn}(t)$ - nível de pressão sonora do decaimento de ordem n , no instante t

T_1 e T_2 - tempo de reverberação da câmara reverberante sem e com o provete respetivamente

d_m - distância entre o microfone e a superfície a ser testada

d_s - distância entre o altifalante e a superfície a ser testada

f_0 - frequência de ressonância

f_i - frequência inicial da banda de 1/3 de oitava

$l_{m\acute{a}x}$ - maior linha reta contida nos limites da câmara reverberante

m_1 e m_2 - coeficiente de atenuação devido à presença do ar da câmara reverberante sem e com provete respetivamente

Δf_i - largura da banda de 1/3 de oitava

$\alpha_i(f)$ - coeficiente de absorção para cada banda de 1/3 de oitava

α_{ix} - coeficiente de absorção sonora para cada banda de um terço de oitava ix

α_{pi} - coeficiente de absorção sonora prático para cada banda de oitava i

α_s - coeficiente de absorção sonora de Sabine

α_w - coeficiente de absorção sonora ponderado

ρ_{ap} - massa volúmica aparente

cm- centímetro

CO₂- Dióxido de Carbono

dB- decibel

Hz- hertz

Kg- quilograma

m- metro

m²- metro quadrado

m³- metro cúbico

mm- milímetro

ms- milissegundos

°C- graus Celsius

RCD- Resíduos de Construção e Demolição

s- segundos

TR- Tempo de reverberação

α - coeficiente de absorção sonora

NRC- coeficiente de redução de ruído

R(f)- coeficiente de reflexão complexo

S- área

V- volume

c- velocidade de propagação do som

t- temperatura do ar

α' - coeficiente de atenuação atmosférica

ABREVIATURAS E SIGLAS

ACS- Sistemas de Controlo Acústico

Agl- Aglomerado

AR- Sistemas de Ressonância Assistida

ASCE- Sociedade Americana dos Engenheiros Civis

C/- Com

CERF- Civil Engineering Research Foundation

FFT- Fast Fourier Transform

IPAC- Instituto Português de Acreditação

ITeCons- Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências de Construção

MDF- Painéis de fibra de média densidade

MRC- Sistemas de Reverberação de Canal Múltiplo

Part- partículas

pu- poliuretano

RRAE- Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e Motivação

O sector da construção civil tem acompanhado o crescente desenvolvimento populacional da sociedade. No entanto, associado a atividades como a construção e demolição de edifícios têm sido incitados impactes ambientais negativos como o consumo excessivo de recursos naturais, nomeadamente água e energia, geração de resíduos de construção e demolição, RCD, emissões atmosféricas, ocupação e contaminação do solo e geração de ruído.

Segundo a estratégia da União Europeia para o Ambiente Urbano, durante a operação dos edifícios é consumida muita energia (42% do total de energia consumida durante o ciclo de vida de um edifício) e, são produzidas 35% de todas as emissões de gases com efeito de estufa no aquecimento e iluminação dos edifícios. Durante a produção de materiais e construção propriamente dita, o consumo de energia, denominada por energia incorporada, é estimada em cerca de 10 a 15%, considerando o ciclo de vida global.

Em relação a outro impacte ambiental, a quantidade de resíduos produzida pela atividade da construção está avaliada em cerca de 40% do total de resíduos. Deste valor, 92% são gerados durante a demolição e 8% atribuídos a atividades construtivas, quer sejam edifícios ou renovações de estruturas existentes (Pinheiro, 2006).

Perante estes dados, a preocupação ambiental é grande. Dados baseados na pesquisa internacional da Civil Engineering Research Foundation (CERF), entidade ligada à Sociedade Americana dos Engenheiros Civis (ASCE), revelam que a questão ambiental é uma das maiores preocupações dos líderes deste sector, logo a seguir à informática. Deste modo, torna-se essencial tomar medidas que minimizem os impactes ambientais negativos provocados pela construção civil, principalmente no uso dos recursos naturais e geração de resíduos.

No que diz respeito à produção de RCD, durante a elaboração de projetos e respetiva execução em obra podem e devem ser adotadas medidas que minimizem a produção e perigosidade dos resíduos gerados, recorrendo à reutilização de materiais e a materiais não suscetíveis de originar RCD contendo substâncias perigosas. Para além disso, devem ser tomadas também medidas que maximizem a valorização de resíduos, utilizando materiais reciclados e recicláveis

Quanto ao uso dos recursos naturais, no projeto de obra bem como durante a fase de obra devem ser tomadas medidas de prevenção ou minimização do consumo de água e de energia tais como, planear a implementação de sistemas de recirculação e reutilização de águas residuais, avaliar o consumo de água das várias atividades realizadas em obra, de modo a identificar e corrigir desvios de consumo, planear a instalação de sensores de movimento e luminosidade para arranque automático da iluminação por exemplo em escritórios e balneários e instalar equipamentos eficientes (AEP, 2011).

Para avaliar a qualidade de um edifício, além dos impactes ambientais causados, o desempenho de um edifício deve também ser considerado, que depende essencialmente de aspetos fundamentais como o conforto, a segurança e a durabilidade do edifício. Associados a estes aspetos podem ser avaliados os confortos térmico e acústico, a segurança contra incêndio e a resistência estrutural aos agentes agressivos e à água.

O conforto acústico é cada vez mais exigido pelos utilizadores dos edifícios pois, caso não sejam cumpridas as condições mínimas, podem surgir inconvenientes na saúde humana tais como, redução da capacidade de comunicação e de memorização, perda ou diminuição da audição e do sono, envelhecimento prematuro, distúrbios neurológicos e cardíacos, entre outros (Boer e Schroten, 2007).

Em Portugal, existe um regulamento, o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) que, cumprindo o regime jurídico relativo ao ruído ambiente, tem por objetivo controlar o conforto acústico de edifícios, contribuindo para a melhoria da qualidade do ambiente acústico e para o bem-estar e saúde das populações.

Através da absorção e do isolamento sonoro o conforto acústico é facilmente conseguido. A absorção sonora pode ser definida como a transformação da energia sonora em energia térmica, conseguida através da passagem de ondas sonoras através de materiais absorventes. O isolamento sonoro está associado à propagação do som entre dois espaços distintos.

Como resposta às necessidades atuais de conforto e à preocupação ambiental, recorrendo a materiais ecológicos que não afetem o ambiente, a utilização da cortiça é uma ótima solução. Este material é 100% natural, de fonte renovável e possui características físicas, nomeadamente o facto de ser bastante poroso, que fazem com que tenha eficiências notáveis no conforto térmico e acústico, proporcionando os níveis de conforto necessários em locais que requerem de condições especiais tais como, salas de conferências, teatros, cinemas, edifícios comerciais, hospitais, escolas, entre outros.

Para além de ser um material sustentável, a cortiça é um material altamente produzido em Portugal. Segundo a APCOR@, 2014, anualmente produz-se em Portugal uma média 150 mil toneladas de cortiça, 50% da produção mundial. Por isso, a cortiça representa, neste momento, a matéria-prima essencial a uma indústria extremamente importante para a economia nacional. Todos os anos são criados no mercado novos produtos com base na cortiça, como por exemplo, os novos pavimentos que imitam visuais de outros materiais (madeira, couro, pedra), produtos com distintas texturas (lisas ou rugosas) com diversas cores e dimensões, tornando possível a combinação com outro tipo de materiais na construção e decoração de edifícios.

Desde o início do século XX, que os governos dos países corticeiros se convenceram da necessidade de desenvolver políticas de proteção e valorização deste material e, a construção civil é uma boa opção contudo, ainda em desenvolvimento.

Uma vez que a absorção sonora da cortiça está concentrada numa zona muito específica do espectro de frequências audíveis pretende-se, nesta dissertação, estudar o efeito da perfuração e a sua combinação com outros materiais absorventes, nomeadamente com espumas acústicas, aliando a sua eficiência na absorção sonora com a estética de espaços interiores.

1.2. Objetivos

O presente estudo tem como objetivo geral, caracterizar a absorção sonora de soluções combinadas de aglomerado de cortiça expandida e espumas absorventes. Pretende-se melhorar a absorção sonora da cortiça ou aliá-la com outros materiais e criar soluções esteticamente interessantes. Para concretizar este objetivo foi necessário:

- Estudar a absorção sonora de diferentes tipos de espumas acústicas;
- Estudar a capacidade de absorção sonora da cortiça;
- Verificar/Analisar a absorção sonora da cortiça combinada com outros materiais absorventes, nomeadamente com espumas acústicas;
- Testar a influência na absorção sonora da perfuração em painéis de cortiça associados a outros materiais;
- E, por último, obter um painel perfurado óptimo de cortiça combinado com uma espuma acústica.

1.3. Estrutura do documento

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos principais.

No presente capítulo, "*Introdução*", realizou-se uma apresentação do tema deste estudo, fez-se um breve enquadramento, a identificação dos objetivos principais desta dissertação, bem como, a motivação que dá origem a este trabalho. Deste modo, expôs-se de uma forma genérica as razões que levam à necessidade da realização deste estudo e identificaram-se, de modo sucinto, os objetivos a que se propõe esta dissertação.

No segundo capítulo, "*Absorção do som*" é feita uma revisão bibliográfica. Apresentam-se algumas noções básicas acerca do tema, alguns materiais e respetivas capacidades de absorção sonora e, no final do capítulo são apresentados alguns métodos de medição em laboratório e in situ do coeficiente de absorção sonora de materiais absorventes.

De seguida, no capítulo "*Materiais, Equipamentos e Método*", descrevem-se as amostras a serem analisadas nos ensaios experimentais, e referem-se os procedimentos seguidos e normas aplicáveis durante os ensaios.

No quarto capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios de absorção sonora. Para além de serem descritos os cálculos efetuados, perante os resultados obtidos e o seu tratamento, faz-se uma análise comparativa do desempenho das diferentes amostras ensaiadas.

Nas "*Conclusões e Trabalhos Futuros*", referem-se as considerações finais da dissertação, obtidas a partir da análise de resultados realizada no capítulo anterior, bem como sugestões de futuros trabalhos nesta temática.

Por último, no sexto capítulo, expõem-se as "*Referências Bibliográficas*" consultadas para a realização desta dissertação.

2. ABSORÇÃO DO SOM

2.1. Absorção sonora

Manter ou melhorar a qualidade de vida é uma preocupação crescente do ser humano. Com o aumento da civilização e, conseqüentemente, com o aumento dos níveis de ruído, o problema da poluição sonora é cada vez mais preocupante. Talvez por isso, a proteção acústica de edifícios tenha ganho destaque nos últimos anos.

Para garantir a qualidade acústica de um determinado espaço é necessário minimizar o ruído de fundo, adequando a reverberação à utilização do espaço e fazendo com que haja inteligibilidade dos sons no interior do espaço.

A absorção sonora é essencial para se obter um ambiente sonoro com qualidade acústica, ajustado à utilização de cada espaço. Através desta propriedade, é possível controlar o som produzido e propagado no interior de um recinto fechado, de acordo com as necessidades (Mateus, 2008).

A absorção sonora pode ser definida como a transformação de energia sonora em alguma outra forma, normalmente em calor, quando passa através de um material. Esta transformação ocorre quando o comprimento das ondas sonoras incidentes num determinado material é pequeno, em comparação com as dimensões das irregularidades das superfícies, nomeadamente dos poros.

Desta forma, a energia do som é dissipada ao circular dentro dos poros ou interstícios dos materiais (Doelle, 1972 e Cowan, 1993).

A eficiência da absorção sonora dos materiais é avaliada pelo coeficiente de absorção sonora, α , definido como a fração de energia sonora incidente absorvida, ou seja, que não é refletida nem transmitida (Doelle, 1972). Este coeficiente varia de “0”, quando existe reflexão total, a “1”, quando a absorção é completa (Everest e Pohlmann, 2009). No entanto, é possível obter coeficientes de absorção sonora superiores a 1. Isto deve-se ao tipo de ensaio e à forma como o valor é calculado que pode, em determinados casos, dar valores incorretos. Coeficientes de absorção que apareçam com valores superiores a 1 devem ser admitidos iguais à unidade em quaisquer cálculos ou considerações efetuados.

De uma forma geral, os materiais com coeficientes de absorção sonora menores que 0,15 podem ser considerados refletores e os que possuem coeficientes de absorção sonora maiores que 0,4, absorventes (António, 2012).

2.1.1. Controlo de reverberação

A reverberação é causada por sucessivas reflexões do som, provocando assim um prolongamento sonoro. O tempo de reverberação, conceito introduzido por Sabine como o, “tempo necessário para que a intensidade ou nível de pressão sonora decaia 60 dB abaixo do seu volume inicial após o desligar da fonte sonora” avalia o conforto acústico num compartimento tendo em conta a reverberação indicada para cada espaço. Este parâmetro depende do volume e da área de absorção do recinto e, para além disso, deve ser ajustado consoante o fim a que se destina cada espaço interior, tentando satisfazer o tempo de reverberação médio aconselhado.

Quando não é cumprido, ou sequer aproximado, o tempo de reverberação médio aconselhado, os espaços interiores podem tornar-se excessivamente reverberantes. Nestes tipos de espaços, as pessoas tendem a desacelerar o seu discurso, falar mais alto e tentar pronunciar melhor as palavras, tornando o seu discurso mais inteligível (Cox e D’Antonio, 2009).

Na Figura 2.1 está representado o diagrama, onde é possível observar os valores do tempo de reverberação médio aconselhado em função do uso e do volume, para uma frequência de 500 Hz.

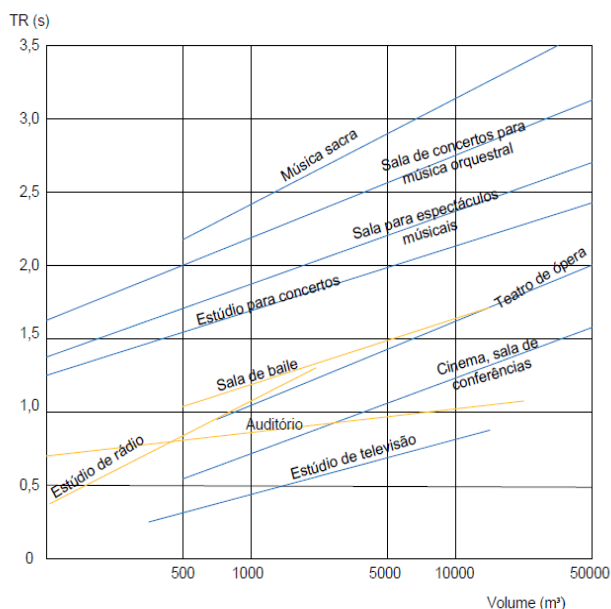


Figura 2.1- Tempos de reverberação aconselhados em função do volume do recinto (f=500Hz) (Ferreira, 2010)

Analisando a figura, conclui-se que para uma sala de conferências o tempo de reverberação ótimo deverá ser reduzido, de modo a que a conversação seja compreensível, sem produzir cansaço no orador e nos ouvintes.

O tempo de reverberação adequado varia muito consoante o tipo de música, por isso, verifica-se que, para salas de ópera são necessários tempos de reverberação baixos, ao contrário de salas de concertos para música de orquestra que requerem valores bem altos.

Observa-se também que o tempo de reverberação deve aumentar com o volume do recinto. Isto deve acontecer porque as distâncias que as ondas sonoras percorrem entre a fonte e os ouvintes aumentam, causando um acréscimo de atenuação sonora.

A grande dificuldade no controlo de reverberação ocorre quando se está perante espaços com múltiplas funções, salas polivalentes, salas de espetáculos, onde o mesmo recinto pode ser utilizado para o teatro, onde se exigem tempos de reverberação muito baixos e absorção elevada, ou para música orquestral, onde a reverberação da sala deve ser elevada e a absorção sonora reduzida. Nestes casos, a qualidade acústica do espaço pode ser conseguida através de dispositivos de acústica variável, que serão explicados detalhadamente na secção 2.2.3.

Adequar os tempos de reverberação a cada tipo de sala é vital. Por isso, é necessário ter em atenção a superfície e a natureza das paredes recorrendo, por vezes, a materiais de absorção, tendo em conta o tipo de mobiliário e número de ocupantes, a localização e o espectro de frequência do som emitido das fontes sonoras e o volume de recinto.

2.1.2. Inteligibilidade

A inteligibilidade é um parâmetro que avalia em percentagem, ou numa escala de 0 a 1, a quantidade de sons, ou palavras, compreensíveis em relação à totalidade emitida, tornando assim esta propriedade bastante subjetiva.

Todas as reflexões que chegam ao recetor durante os primeiros 50 ms a partir da receção do som não são diferenciadas, isto é, a sua perceção forma apenas um som com um nível mais elevado, melhorando a inteligibilidade.

Caso o atraso entre o som direto e o som refletido seja superior a 50 ms, o que equivale a uma distância aproximadamente de 17m entre o caminho tomado pelo som direto e pelo som refletido, a sua perceção é diferenciada (ver Figura 2.2). Nesta situação, as reflexões denominam-se de ecos e prejudicam a inteligibilidade da fala. (Isbert, 1998).

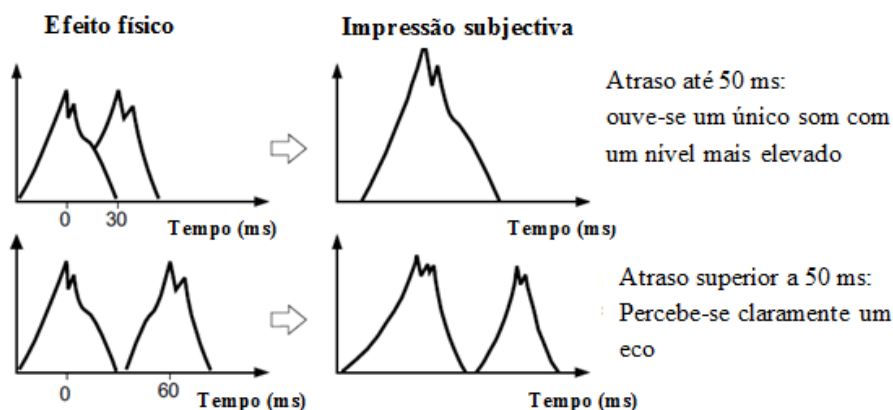


Figura 2.2- Sobreposição de sons com diferentes atrasos e impressão subjetiva associada (Isbert, 1998).

O facto de ocorrerem fenómenos de reflexão indesejados influencia significativamente a inteligibilidade dos sons. Os ecos múltiplos, repetições múltiplas espaçadas, com curtos intervalos de tempo, do som originado por uma fonte sonora são, por vezes, bastante desagradáveis e ocorrem normalmente quando a fonte sonora se situa entre duas paredes refletoras relativamente próximas, ou em locais em que as suas paredes são côncavas, por exemplo salas redondas, semiesféricas e semicilíndricas.

Todos estes problemas de reflexão podem ser minimizados, melhorando a inteligibilidade, caso as paredes sejam revestidas por materiais de absorção sonora. (Mateus, 2008).

2.2. Sistemas Absorventes

Os materiais absorventes são usados para conseguir tempos de reverberação adequados num determinado espaço e prevenir ou eliminar ecos em determinados espaços, por exemplo, restaurantes, salas de aula, fábricas ou estações (Isbert, 1998).

Todos os materiais absorvem energia sonora. No entanto, os materiais com maior capacidade de absorção podem ser divididos em três categorias: porosos ou fibrosos, mais eficazes em altas frequências, sistemas ressonantes constituídos por ressoadores, que apresentam geralmente maior absorção em frequências médias, ou por membranas, com maior capacidade de absorção em baixas frequências e dispositivos de acústica variável, capazes de expor superfícies absorventes e refletoras conforme as necessidades (Mateus, 2008 e Silva, 2013).

Na Figura 2.3 apresentam-se os coeficientes de absorção sonora, α , de uma solução acústica combinando sistemas absorventes, um painel ou membrana ressonante, um ressonador de Helmholtz e um material poroso entre o painel e o elemento rígido.

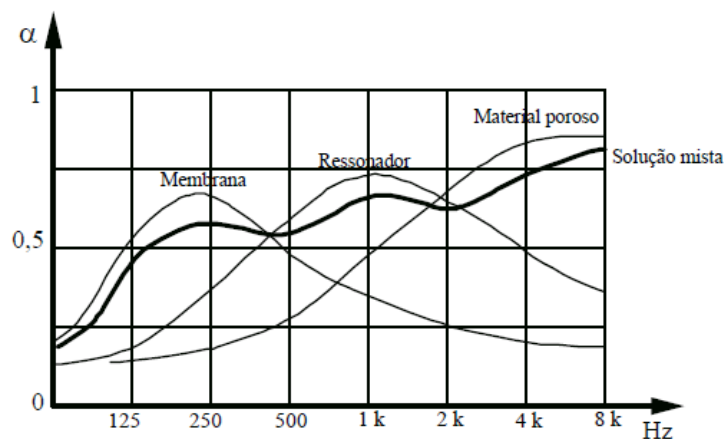


Figura 2.3- Coeficientes de absorção sonora, α , de uma solução mista (Tadeu et al, 2007)

Através da Figura 2.3 pode comprovar-se o que foi referido anteriormente, nomeadamente, as frequências de eficiência de absorção sonora para cada sistema absorvente e, para além disso, pode concluir-se que caso se utilize uma solução mista, a absorção sonora é significativa em toda a gama de frequências audíveis.

A escolha de uma solução acústica depende dos seguintes critérios:

- Custo do material, da instalação e manutenção;
- Facilidade de instalação;
- Durabilidade;
- Resistência ao fogo e à propagação das chamas;
- Coeficientes de absorção em frequências representativas da faixa audível;
- Estética;
- Influência na saúde pública (Doelle, 1972).

2.2.1. Materiais porosos ou fibrosos

Os materiais porosos ou fibrosos podem ser definidos como materiais em que a parte maciça apenas ocupa uma percentagem do seu volume, isto é, que contêm espaços “vazios”, preenchidos por ar.

Nos materiais fibrosos, as fibras ao receberem o som acompanham o movimento das moléculas de ar, absorvendo, deste modo, parte da energia sonora que se transforma em energia térmica, sendo que, outra parte atravessa o material e, a restante é refletida.

Os materiais porosos são constituídos por pequenos orifícios abertos para o exterior, que podem ou não comunicar entre si (ver Figura 2.4). O ar contido nesses orifícios é submetido a pequenos movimentos oscilatórios e, através do atrito sobre as paredes sólidas, ocorre a transformação da energia sonora em energia térmica (Bastos, 2010). Uma pequena quantidade de energia sonora atravessa o material, no entanto, em menor quantidade do que nos materiais fibrosos.

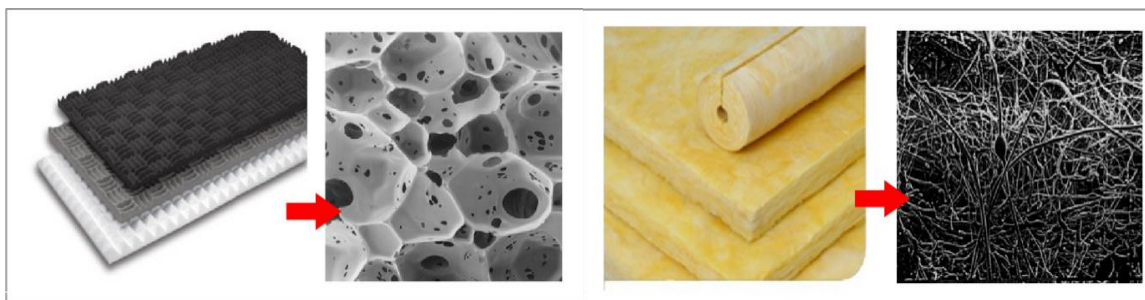


Figura 2.4- Estrutura de materiais porosos e fibrosos respetivamente (LABCON@, 2014)

A absorção sonora nos materiais porosos e fibrosos, como já foi referido anteriormente, é mais eficiente em frequências altas do que em frequências baixas. No entanto, nas frequências baixas a absorção aumenta com a espessura do material, enquanto que, nas frequências altas, a espessura não tem grande influência sobre o coeficiente de absorção sonora, como pode ser observado na Figura 2.8 representativa do coeficiente de absorção sonora de massas porosas.

Para além da espessura, a absorção sonora destes materiais depende fundamentalmente da densidade e porosidade, aumentando consoante o aumento destas propriedades e também do tipo de pintura, esta não deve ser sobreposta aos poros, uma vez que impermeabiliza o material, e conseqüentemente, diminui a sua capacidade de absorção sonora (Bastos, 2010).

Existe uma enorme gama de materiais porosos e fibrosos disponíveis no mercado com capacidade absorvente. De seguida, a título de exemplo, serão apresentados alguns desses tipos de materiais.

2.2.1.1. Lãs minerais

Este material pode apresentar-se sob a forma de placas ou mantas. As placas são elementos rígidos ou semirrígidos e podem ter um aspeto liso, perfurado, ou estriado. As mantas, pelo contrário são mais flexíveis (Rodrigues, 2008; LABCON@, 2014 e Martins, 2008).

Existe ainda outra forma de apresentação das fibras minerais, designada por absorventes suspensos ou baffles (ver Figura 2.5). Os baffles são placas flexíveis e pouco densas,

protegidas com uma película de polietileno. São suspensas no teto, na vertical, aumentando assim a sua área de absorção, uma vez que cada absorvente atua nas duas faces. A sua utilização é comum em espaços de grande volume, quando se pretende reduzir o tempo de reverberação (Martins, 2008).



Figura 2.5- Baffles acústicos suspensos (AKUSTIKE@, 2014)

O fabrico de lãs minerais pelo homem tem um custo reduzido e pode ser parcialmente reciclado, contudo são necessárias enormes quantidades de energia na sua produção, aumentando o impacto ambiental destes materiais.

- **Lã de vidro**

A lã de vidro é um dos melhores materiais para o condicionamento acústico de altas frequências, uma vez que, devido às suas características de porosidade, assim que uma onda sonora incide neste material é facilmente absorvida.

Este material é obtido a partir de sílica e sódio em estado líquido, a uma temperatura de 1600°C, posteriormente, a sílica e o sódio são sujeitos a um arrefecimento controlado, através da passagem do líquido por orifícios finos e reguláveis de platina, de modo a obter fios de tamanho e diâmetro desejados. Finalmente, são aglomerados com resinas em mantas ou placas (AECWEB@, 2014)

A sua aplicação na construção é feita normalmente como painéis de revestimento de paredes, facilmente removíveis e com a possibilidade de serem pintados. Estes painéis podem ser instalados em áreas comuns de condomínios residenciais, como salão de festas e salão de jogos. (ISOVER@, 2014)

- **Lã de rocha**

A lã de rocha é obtida pela fusão de distintos tipos de rocha a uma temperatura de 1500° C para a obtenção de fibras. Posteriormente, para formar uma manta ou uma placa (ver Figura 2.6), estas fibras são aglutinadas por uma resina.

A lã de rocha também pode ser usada para o controlo do tempo de reverberação quando é aplicada no interior de painéis perfurados e devidamente protegida, de modo a evitar a libertação de partículas (Silva, 2012).



Figura 2.6- Manta de lã de vidro e placa de lã de rocha respetivamente (ARCHIPRODUCTS@, 2014 e FRASMIL@, 2014)

A Figura 2.7 apresenta os coeficientes de absorção sonora dos materiais lã de rocha e lã de vidro com 10cm de espessura. Como era previsto, os dois materiais apresentam absorção sonora alta em frequências elevadas.

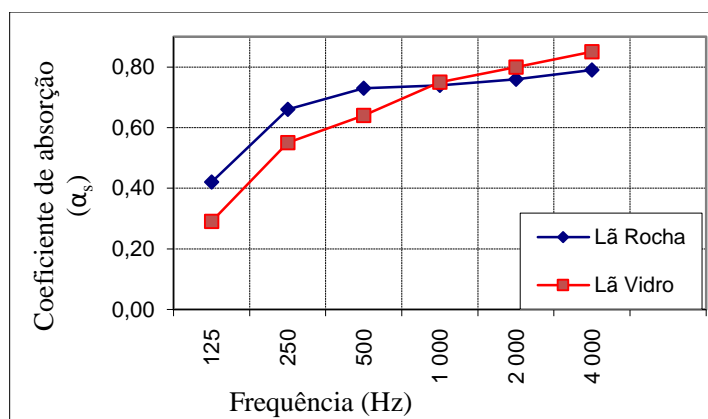


Figura 2.7- Coeficientes de absorção sonora dos materiais lã de rocha e lã de vidro com 10 cm de espessura (adaptado de Jadir e Lima, 2009)

2.2.1.2. Massas porosas

Outro tipo de material poroso absorvente sonoro são as massas porosas. Estas são compostas por fibras ou minerais granulados e aglutinantes apropriados e, normalmente, aplicadas por projeção sobre paredes e tetos, em superfícies irregulares, ou em locais que apresentam grandes inconstâncias na humidade relativa do ar ou condensações de vapor de água.

As massas porosas para projeção são excelentes materiais absorventes, verificando-se um aumento da sua absorção nas baixas frequências à medida que existe um aumento da sua espessura, característica típica de materiais porosos, como já fora referido anteriormente e, como pode ser observado na Figura 2.8.

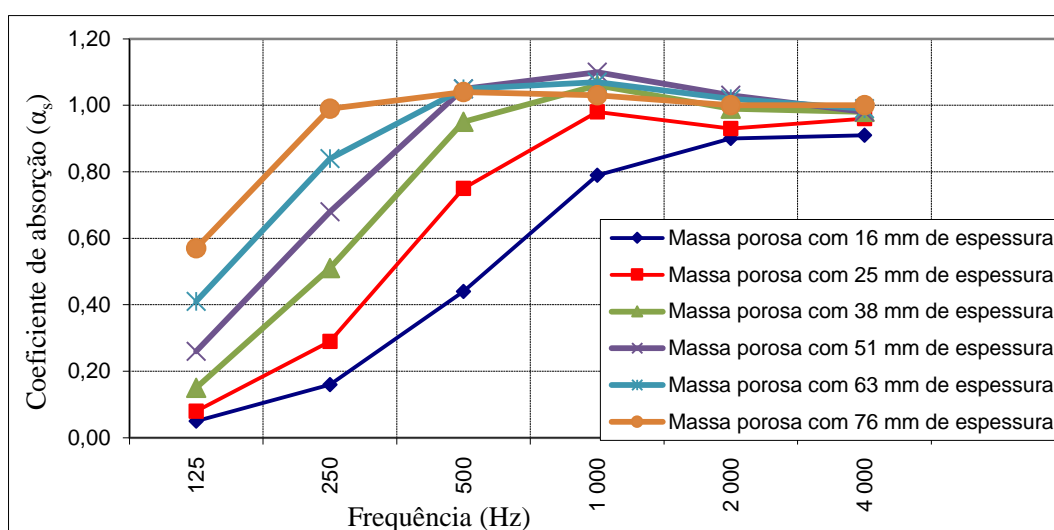


Figura 2.8- Exemplos de coeficientes de absorção sonora para massa porosa projetada aplicada sobre uma superfície rígida em diversas espessuras (adaptado de Ferreira, 2010).

2.2.1.3. Espumas acústicas

A estrutura das espumas acústicas pode ser de células abertas ou fechadas. Caso seja de células abertas, os poros estão interligados e a eficiência da absorção sonora é significativa. Se for de células fechadas, a absorção é reduzida, uma vez que é dificultada a passagem das ondas sonoras. No entanto, após o processo de fabrico, é possível perfurar estas estruturas, aumentando a absorção sonora deste material.

- **Espuma de poliuretano**

As espumas de poliuretano são materiais de construção com estrutura de células abertas, flexíveis e com baixa resistência à passagem de ar, o que faz com que este material tenha uma

elevada capacidade de absorção sonora. Sendo um material poroso, apresenta maior eficácia em altas frequências, como ilustrado na Figura 2.10.

Os aglomerados de espuma de poliuretano (ver Figura 2.9) podem ser considerados como produtos de origem reciclada, uma vez que, são obtidos a partir de retalhos de espumas de poliuretano. Esta forma de utilização deste material é cada vez mais recorrente, por ter alta eficiência na absorção sonora mas também pelo interesse ambiental. Por serem compostas por produtos petroquímicos, estas espumas causam um elevado impacto ambiental negativo durante o processo de fabrico, libertando gases tóxicos durante a sua expansão e também, no fim da sua vida útil, quando queimadas. Ao serem reutilizadas faz com que haja uma diminuição da libertação destes gases tóxicos causada por estes materiais.

Para além disso, as espumas de poliuretano são consideradas inflamáveis no entanto, podem ser sujeitas a tratamentos que melhoram o seu desempenho no que diz respeito à segurança ao fogo (Flach, 2012). A sua utilização pode ser combinada com outros materiais absorventes, nomeadamente com lãs minerais, e é normalmente aplicado em estúdios de gravação, auditórios e salas de teatro (Silva, 2012).



Figura 2.9- Aglomerado de espuma de poliuretano
(EMBALAPLAST@, 2014)

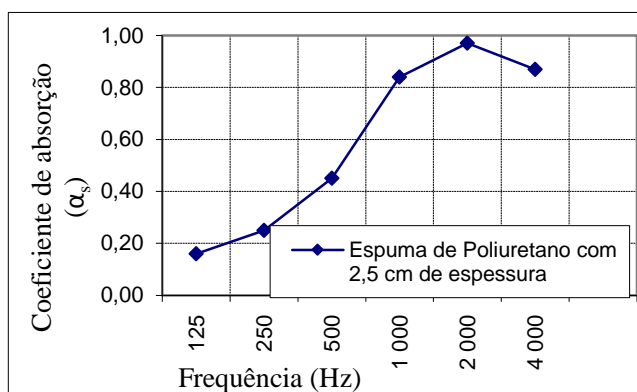


Figura 2.10- Coeficientes de absorção sonora de uma espuma de poliuretano com 2,5 cm de espessura
(adaptado de LOGACUSTICA@, 2014)

2.2.1.4. Alcatifas e tecidos

As alcatifas, para além da sua utilização tradicional, criando ambientes originais e requintados na decoração, são cada vez mais utilizados com o objetivo de aumentar o conforto de locais fechados, reduzindo e, em alguns casos eliminando completamente os ruídos de impacto e, absorvendo os sons aéreos de altas frequências, como pode ser comprovado na Figura 2.11 (Cox e D'Antonio, 2009).

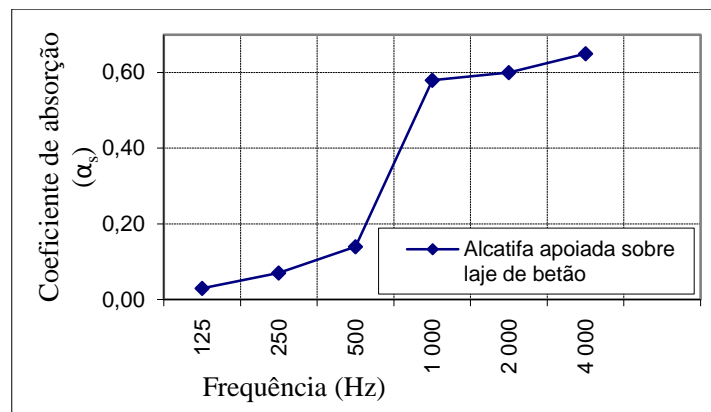


Figura 2.11- Valores do coeficiente de absorção sonora de uma alcatifa sobre uma laje de betão armado (Rodrigues, 2008)

A absorção sonora de alcatifas e tecidos varia consoante a espessura, textura e a sua composição. Por exemplo, em tecidos decorativos, como cortinas que servem de resguardo em portas, denominadas reposteiros, a absorção sonora depende, para além das propriedades referidas anteriormente, da percentagem de franzido, conforme pode ser visto na Figura 2.12 (Doelle, 1972 e Rodrigues, 2008).

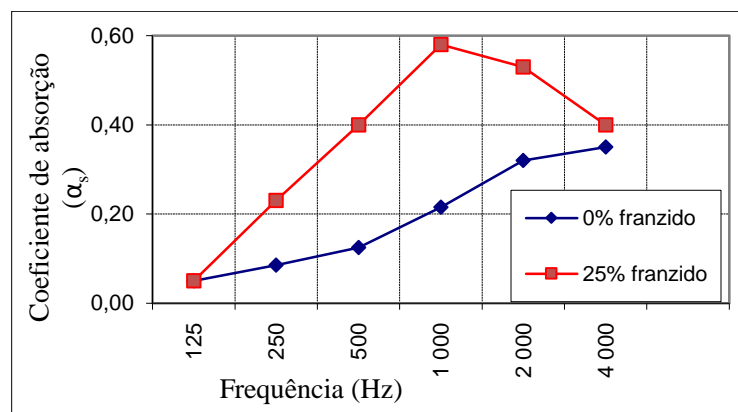


Figura 2.12- Valores do coeficiente de absorção sonora de um reposteiro de algodão com diferentes percentagens de franzido (Domingues, 2005)

2.2.1.5. Gesso acústico

Na grande maioria dos casos, os arquitetos optam por tratamentos acústicos que não afetem a estética visual. O gesso acústico é um material absorvente sonoro poroso, capaz de cumprir os requisitos estéticos de arquitetos e *designers* de interiores (Cox e D'Antonio, 2009).

Este tipo de material é aplicado com uma consistência semiplástica, pulverizado por spray ou espalhado com uma espátula e, normalmente, usado onde qualquer outro tratamento acústico seria impraticável devido à forma irregular da superfície. É eficiente em frequências mais elevadas, tal como os restantes materiais porosos, no entanto, a sua eficiência para além de variar com a sua espessura, depende também da composição da mistura de gesso (ver Figura 2.13) (Doelle, 1972).

Através da Figura 2.13 pode verificar-se que com o aumento da espessura, aumenta também a absorção nas baixas frequências, mantendo a alta absorção em frequências mais elevadas. Para além disso, verifica-se que a eficiência de absorção sonora é superior para o acabamento fosco, seguindo-se o acabamento resiliente e, por último, o acabamento clássico.

Esta diferença depende da composição de cada gesso. O acabamento clássico é mais liso, composto por grãos finos e aplicado com espátula, contrariamente ao acabamento fosco, que tem um acabamento areado claro, lavável, resistente ao bolor, apresentando também por isso uma melhor manutenção. O acabamento resiliente é também lavável, resistente aos bolores, mas é um acabamento liso à espátula.

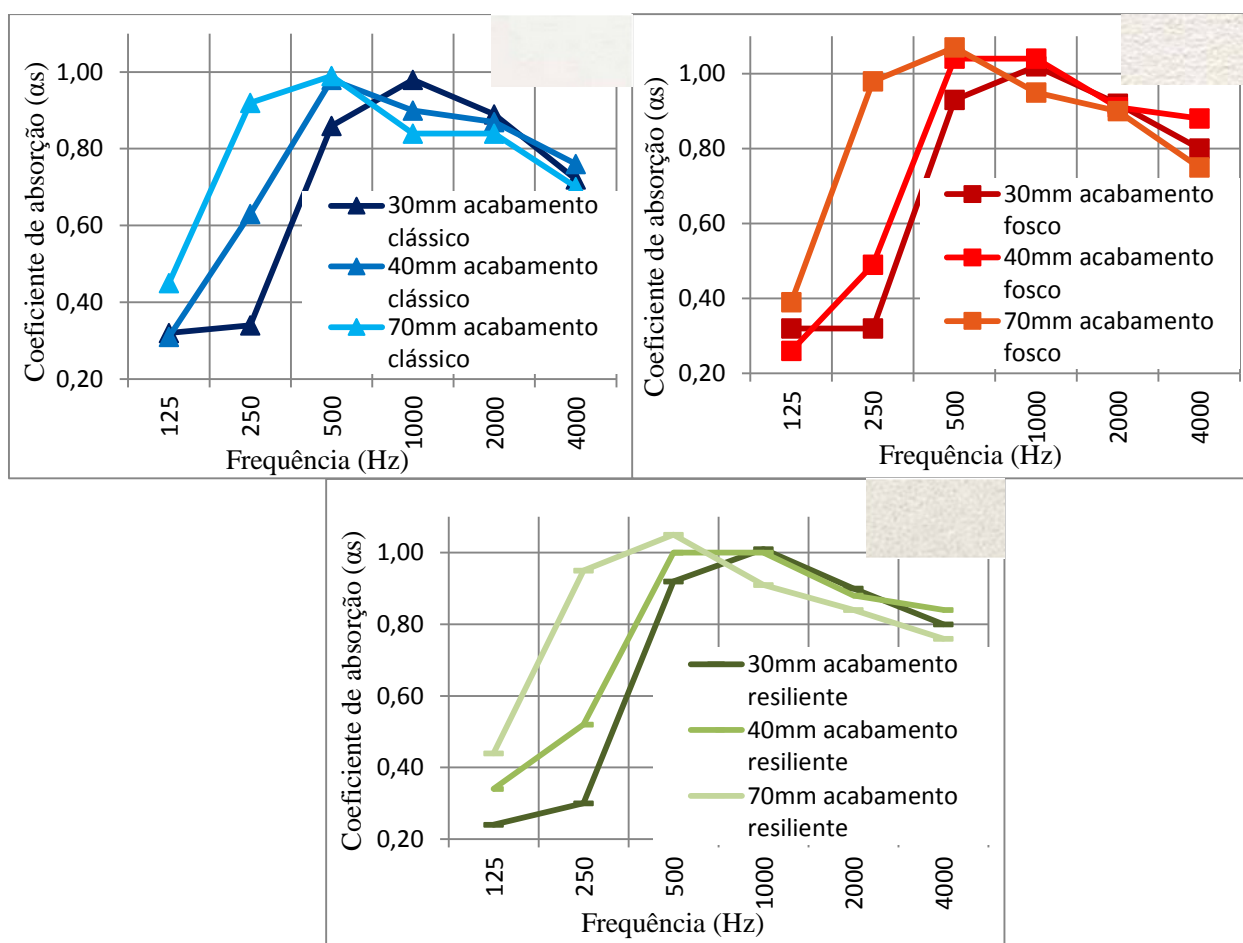


Figura 2.13-Coefficientes de absorção sonora do gesso acústico consoante a espessura e composição (BASWAPHON@2014)

2.2.1.6. Materiais sustentáveis

Atualmente, elementos absorventes fabricados com materiais sintéticos, como alguns dos apresentados anteriormente, ainda são utilizados excessivamente na indústria da construção.

Estes materiais não-biodegradáveis, para além de causarem poluição quando são depositados, requerem muita energia de produção durante o seu fabrico e, alguns emitem gases com efeito de estufa.

Alertado e consciente dos problemas ambientais, o sector da construção mostra-se sensibilizado a desenvolver estudos que revelem o potencial de resíduos de materiais não convencionais como materiais de absorção sonora, tornando assim, a atividade da construção mais sustentável (Flach, 2012, Mateus, 2012 e Silva, 2012).

De seguida, apresentam-se alguns materiais considerados mais sustentáveis ou porque resultam do aproveitamento de resíduos ou de matérias-primas naturais. Os materiais sustentáveis que vão ser abordados são: granulados e aglomerados de cortiça, fibras naturais de cana-de-açúcar, e resíduos de pneus.

- **Granulados e aglomerados de cortiça**

Os granulados de cortiça (ver Figura 2.14) são subprodutos da indústria corticeira. Este material é utilizado como agregado na produção de betões leves, ou como material que tem funções térmico-acústicas em edifícios.

Quanto aos aglomerados, estes são materiais produzidos a partir da compactação de granulados de cortiça e existem dois tipos, simples ou compostos.

Os aglomerados simples, negros ou puros expandidos (ver Figuras 2.15), podem ser fabricados com ou sem material ligante, utilizando granulados de diversas granulometrias, temperaturas e pressões, com vapor de água em autoclave. Os aglomerados compostos, assim chamados pois são combinados com outros materiais, por exemplo borracha, são obtidos pela prensagem e aglomeração dos granulados com resina sintética. Placas de revestimento de pavimentos, ou paredes, normalmente revestidas por películas, como vernizes, são exemplos destes aglomerados compostos.



Figura 2.14- Granulados de cortiça
(JPSCORK@,2014)



Figura 2.15- Aglomerado de cortiça expandida
(AMORIM@, 2014)

Comparando os dois tipos de aglomerados no que diz respeito à absorção sonora, a diferença observada no gráfico da Figura 2.16 deve-se essencialmente ao processo de fabrico destes materiais (Eires, 2006 e Martins, 2008).

A cortiça, para além de ser um material sustentável, é impermeável, imputrescível e resistente ao fogo, características bastante vantajosas à sua utilização como absorvente sonoro

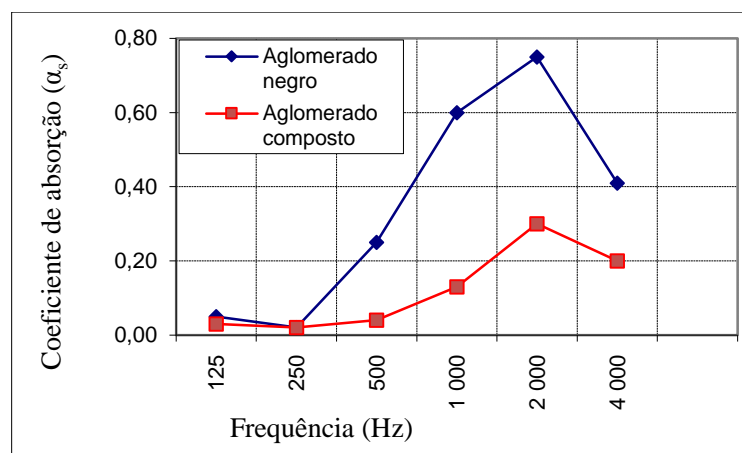


Figura 2.16- Absorção sonora de aglomerados negros e aglomerados compostos de cortiça (Domingues, 2005)

- **Fibras Naturais de Cana-de-açúcar**

O uso de fibras naturais, ainda pouco comum, permite produzir materiais muito absorventes cuja eficiência de absorção acústica depende do diâmetro das fibras e do grau de consolidação. Quanto menor for o diâmetro das fibras, mais absorventes são os materiais e, relativamente ao grau de consolidação, o seu aumento favorece a eficiência de absorção.

No que diz respeito ao risco de incêndio, os materiais de fibras naturais são habitualmente tratados com produtos químicos retardantes de fogo de modo a torná-los seguros (Oldham et al, 2011).

Existem vários tipos de fibras naturais: fibras de coco, cânhamo, cana-de-açúcar, entre outros. No entanto, por opção, nesta dissertação, apenas vão ser apresentadas as características das fibras de cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar é a principal matéria-prima no fabrico de açúcar e álcool. Contudo, os seus resíduos podem ser também reaproveitados. Os resíduos desta planta são constituídos por fibras flexíveis e de pequenas dimensões (ver Figura 2.17) que têm potencialidade como absorventes sonoros. O facto de este material ser flexível, poderá ser um problema mas, se combinado com outro material mais resistente, este problema poderá ser solucionado.



Figura 2.17- Fibras naturais de cana-de-açúcar (Putra et al, 2013)

Relativamente ao coeficiente de absorção sonora deste material, através da Figura 2.18 nota-se que, nas frequências baixas é próximo de um tecido, chegando a ser superior ao coeficiente de absorção sonora do tecido entre as frequências 1000 Hz e 1800 Hz. Nas altas frequências apresenta elevada absorção sonora contudo, inferior à de um tecido.

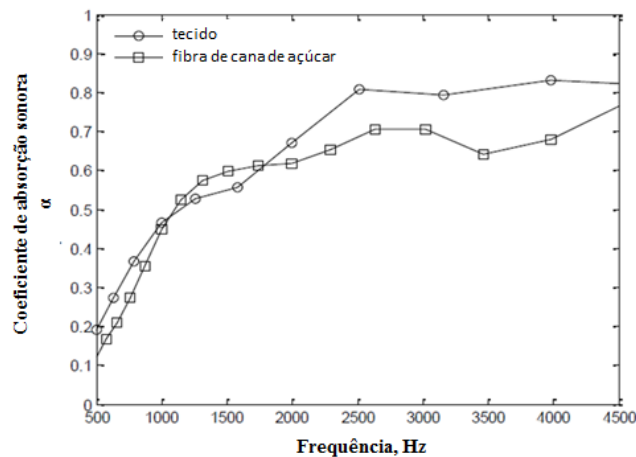


Figura 2.18- Comparação do coeficiente de absorção sonora de fibras de cana-de-açúcar e um tecido (Putra et al, 2013)

- **Resíduos de pneus**

Com o avanço da civilização, a quantidade de resíduos de pneus está a aumentar progressivamente. Este material é composto por borracha, o que faz com que seja resistente à degradação biológica, tenha elevado poder calorífico e seja altamente combustível.

Para além disso, quando os resíduos de pneus são queimados, libertam gases que contêm dióxido de enxofre, um dos principais gases causadores de chuvas ácidas e, quando são depositados inadequadamente, estes resíduos ainda provocam proliferação de vários mosquitos.

Uma vez que os pneus têm um curto tempo de vida útil e causam elevados problemas a nível ambiental e da saúde humana, torna-se necessário desenvolver métodos para a sua reciclagem. Têm sido desenvolvidos vários estudos de aproveitamento destes materiais para fabricar elementos com aplicação na área da acústica, por exemplo com propriedades de absorção sonora, entre outras.

Em Iksan National College foi desenvolvido um estudo com o objetivo de verificar a possibilidade da utilização de resíduos de pneus reforçados com palha de arroz como materiais de construção. Neste estudo foram testadas as propriedades físicas, mecânicas e acústicas de uma amostra composta por palha de arroz e resíduos de pneus.

No que diz respeito às propriedades acústicas da amostra, através da comparação com outros materiais de construção, como aglomerado de partículas de madeira, aglomerado de fibras de madeira (MDF), painel de madeira (contraplacado), azulejos, piso de madeira e cimento, concluiu-se que os coeficientes de absorção sonora da amostra em estudo são superiores aos coeficientes de absorção sonora dos restantes materiais à base de madeira, MDF, aglomerado de partículas de madeira e contraplacado nas médias e altas frequências. Além disso, a amostra apresenta melhor absorção sonora, em relação aos azulejos, ao piso de madeira e ao cimento em toda a faixa de frequências (ver Figura 2.19).

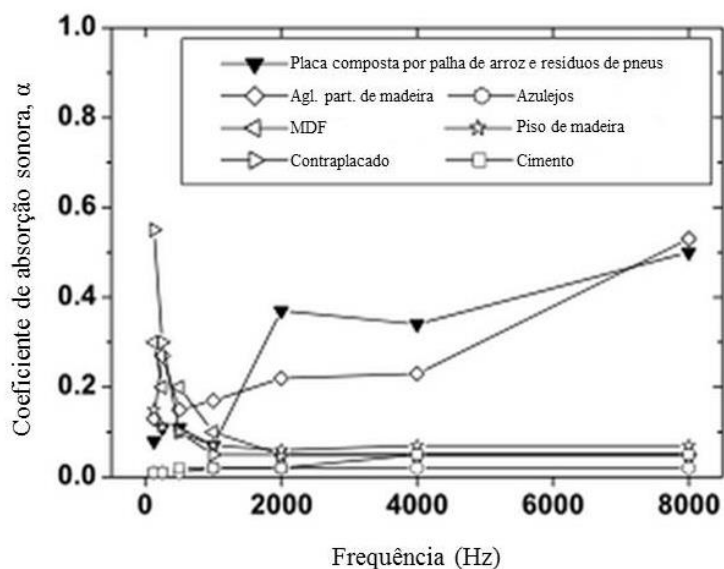


Figura 2.19- Coeficientes de absorção sonora de uma placa composta por palha de arroz e resíduos de pneus em comparação com os de outros materiais de construção (Yang et al, 2004)

2.2.2. Sistemas Ressonantes

A ressonância acústica ocorre quando uma fonte sonora emite um som de frequência igual à frequência de vibração natural de um recetor. Através desta característica, presente em sistemas ressonantes, é possível obter absorção sonora de baixas e médias frequências, dificilmente atingida por materiais porosos.

Os ressoadores são elementos absorventes de som bastante seletivos, ou seja, são dimensionados para uma frequência de ressonância específica (ver equação (1)). Estes elementos, quando expostos a determinadas frequências, vibram, transformando parte da energia sonora, em energia mecânica e, posteriormente, devido à fricção interna de deformação, em energia térmica.

Existem dois tipos destes dispositivos: ressoadores de cavidade e membranas ressonantes (Bastos, 2010, Cox e D'Antonio, 2009 e Domingues, 2005).

2.2.2.1. Ressoadores de cavidade

Os ressoadores de cavidade ou de Helmholtz, também denominados absorventes de cavidade, consistem num volume de ar no interior de uma cavidade, ligado à atmosfera através de uma abertura estreita (“pescoço”), na qual as ondas se propagam (ver Figura 2.20).

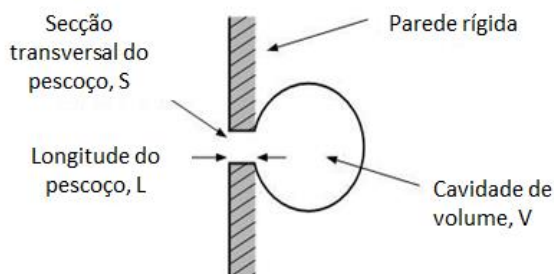


Figura 2.20-Esquema básico de um ressoador simples de cavidade (Helmholtz) montado numa parede (Isbert, 1998)

Estes tipos de absorventes são, normalmente, aplicados no sector da construção como painéis perfurados ou estriados (ver Figuras 2.21 e 2.22), utilizados em salas de aulas por exemplo, ou também como blocos de betão com câmaras de Helmholtz (ver Figura 2.23), habitualmente utilizados em espaços fechados de grande volume tais como, ginásios, piscinas, entre outros. (Doelle, 1972, Isbert, 1998, António, 2012).

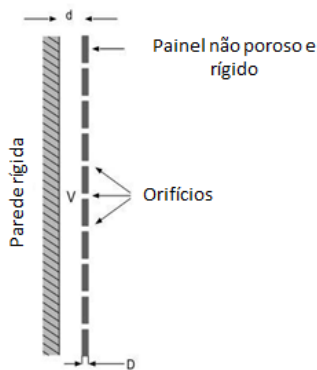


Figura 2.21-- Esquema básico de um ressoador múltiplo de cavidade (Helmholtz) à base de painéis perfurados ou estriados (Isbert, 1998)

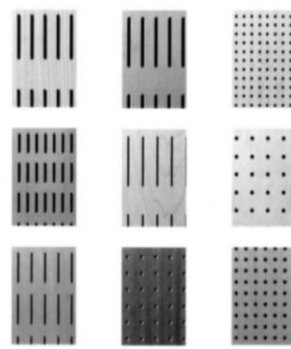


Figura 2.22- Ressoadores à base de painéis perfurados e estriados (Isbert, 1998)



Figura 2.23- Blocos de betão com câmaras Helmholtz (ARCHIPRODUCTS@, 2014)

Os ressoadores de Helmholtz são aplicados no condicionamento acústico para absorver som de frequências médias, contudo a sua capacidade de absorção sonora varia com a largura da abertura e com a profundidade da cavidade, como se pode verificar na Figura 2.24. De qualquer modo, com o objetivo de alargar a banda de frequências onde estes dispositivos têm eficiência, é normal a colocação de materiais absorventes porosos, na parte da abertura do ressoador, ou apenas por trás do painel perfurado (Cox e D'Antonio, 2009).

A frequência de ressonância, f_0 , de um ressoador de Helmholtz é dada pela expressão (António, 2012):

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l'V}} \quad (1)$$

onde,

c é a velocidade de propagação do som

S é a área da abertura da cavidade

$l' = l + \Delta l$, sendo l o comprimento da cavidade

$\Delta l = 0,958\sqrt{S}$ para uma abertura circular da cavidade de um ressoador sem porosidade nas paredes

$\Delta l = 0,4\sqrt{S}$ para aberturas retangulares

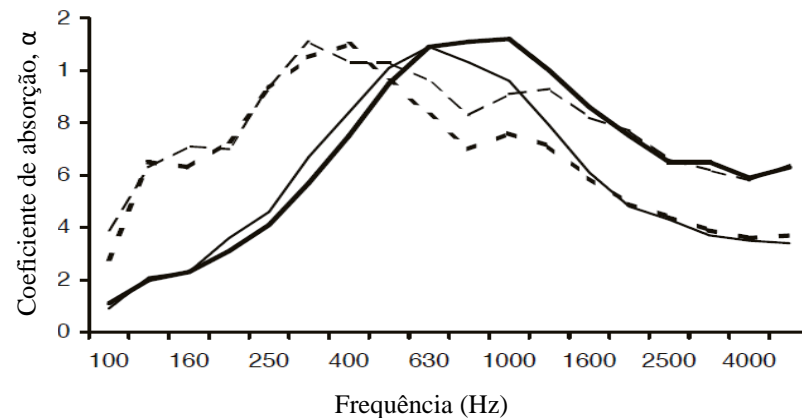


Figura 2.24- Coeficientes de absorção sonora para diferentes absorvedores de Helmholtz(Cox e D'Antonio, 2009):

- pequena abertura, cavidade pouco profunda;
- grande abertura, cavidade pouco profunda;
- - - pequena abertura, cavidade profunda;
- - - grande abertura, cavidade profunda

2.2.2.2. Membranas ressonantes

Membranas ou painéis ressonantes (ver Figura 2.25) são constituídos por um painel flexível afastado da sua base de suporte, na vertical ou na horizontal. A dissipação de energia sonora ocorre através do movimento vibratório do painel, deste modo, à medida que o som incide sobre o painel faz com que ele vibre, transformando a energia sonora em energia cinética. A energia cinética é também dissipada devido aos atritos internos de deformação e de atrito nos apoios (António, 2012).

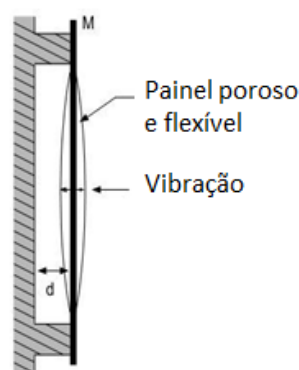


Figura 2.25- Esquema básico de um ressonador de membrana (Isbert, 1998)

O coeficiente de absorção sonora é mais elevado numa estreita gama de frequências baixas mas, tal como nos ressonadores de cavidade, a gama de frequências onde este material é eficiente pode aumentar caso a caixa-de-ar seja preenchida com um material poroso,

principalmente nas médias e altas frequências, como se pode verificar na Figura 2.26. Para além disso, a absorção também depende do tamanho do painel, da sua espessura, do material com que é fabricado e da espessura da caixa-de-ar.

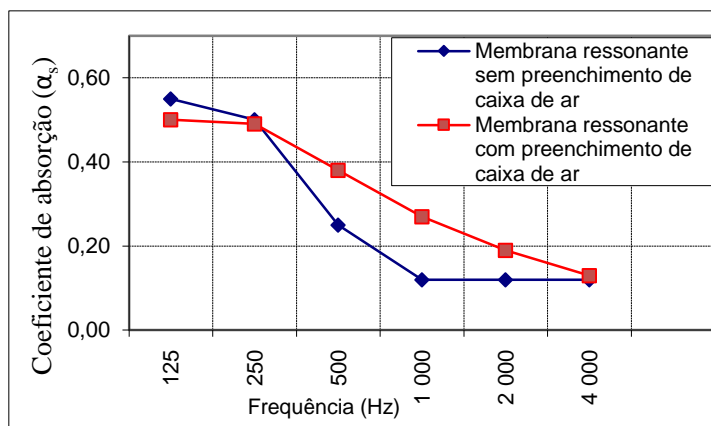


Figura 2.26- Características de absorção sonora de sistemas tipo membrana ressonante, com e sem preenchimento por material absorvente na caixa-de-ar (adaptado de Domingues, 2005)

2.2.3. Dispositivos de acústica variável

Como foi referido anteriormente, existem espaços com diferentes necessidades acústicas, que requerem vários tempos de reverberação consoante o seu uso. Exemplos destes espaços são as salas de espetáculos, os auditórios, entre outros espaços interiores.

Estas exigências acústicas têm sido muito desafiantes para arquitetos e especialistas em acústica pois, é bastante complicado projetar construções de absorção de som especiais, capazes de variar os tempos de reverberação consoante a necessidade. No entanto, já existem alguns elementos capazes de variar a sua absorção sonora, apresentados nas próximas secções.

2.2.3.1. Elementos físicos variáveis

Já foram feitas algumas tentativas de desenvolver elementos físicos variáveis, nomeadamente em estúdios de rádio, onde foram aplicados vários painéis móveis e rotativos suspensos, capazes de expor superfícies refletoras ou de absorção conforme as necessidades. Mas, a construção destes dispositivos só seria viável em espaços onde a presença humana fosse permanente e, caso fossem capazes de provocar uma absorção sonora razoável, pelo menos 20 por cento, da absorção sonora total sobre uma região considerável da faixa audível (Doelle, 1972).

Outros exemplos de elementos físicos aplicados em espaços de acústica variável são as cortinas, já mencionadas na secção 2.2.1.4 e as cadeiras móveis.

Em relação à absorção sonora das cadeiras móveis, estas podem ser divididas em três categorias: cadeiras com alta, média ou pouca percentagem de superfície estofada (ver Figura 2.27). Através da Figura 2.28 pode verificar-se que a absorção sonora é bastante diferente consoante o facto de a cadeira estar ocupada ou vazia e, para além disso, conclui-se também que, quanto maior for a percentagem de estofado, maior será a absorção sonora da cadeira.

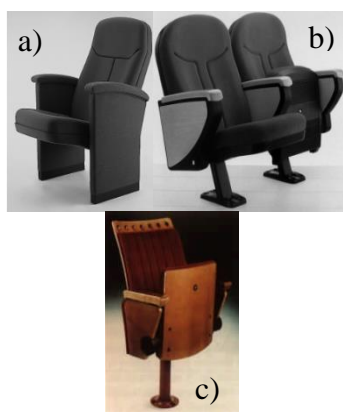


Figura 2.27- Cadeiras móveis

(Isbert, 1998):

- a) Com alta % estofada;
- b) Com média % estofada;
- c) Com baixa % estofada

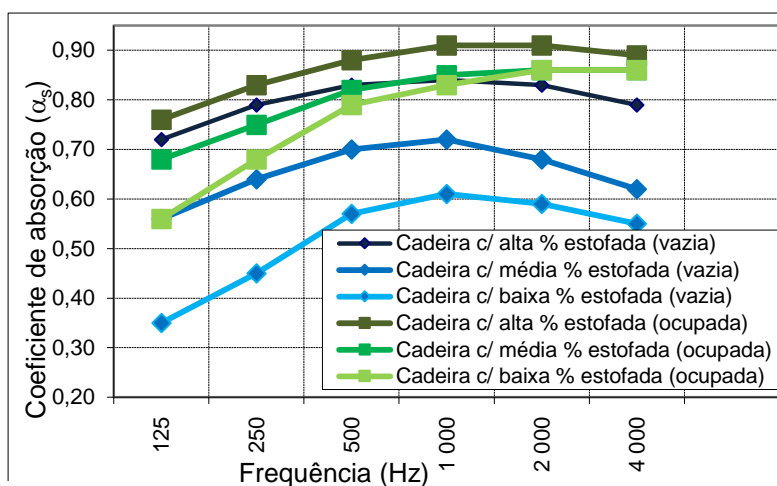


Figura 2.28- Coeficiente de absorção sonora de cadeiras móveis vazias e ocupadas com diferentes percentagens de estofado (Isbert, 1998)

O ajuste do tempo de reverberação recorrendo a cadeiras móveis ainda é pouco utilizado uma vez que, para que os efeitos na absorção sonora sejam significativos, é necessário uma grande quantidade de cadeiras estofadas.

2.2.3.2. Sistemas eletroacústicos

Para além de elementos físicos, capazes de adequar os tempos de reverberação à utilização de um espaço com diferentes utilidades, existem também sistemas elétricos capazes de controlar a reverberação desses espaços. Todos estes sistemas baseiam-se na captação e processamento do sinal sonoro por microfones distribuídos pela sala. De seguida, o sinal sonoro, através de amplificadores, é amplificado e enviado a altifalantes, também distribuídos pela sala, aumentando o campo sonoro existente.

Existem três principais sistemas eletroacústicos sendo que, a diferença entre eles está na quantidade e localização de microfones e altifalantes e, no tipo de processamento do sinal.

Os sistemas de Ressonância Assistida-AR (ver Figura 2.29), normalmente utilizados para resolver problemas de baixo tempo de reverberação em baixas frequências são eficientes em frequências menores que 2000 Hz (ver Figura 2.30) e utilizam um grande número de microfones e altifalantes, cerca de 172.

O sistema de reverberação de canal múltiplo- MRC, funciona corretamente numa banda mais larga de frequências, desde 63 Hz até 8000 Hz e, necessita também de um grande número de canais, isto é um conjunto grande de microfones, amplificadores e altifalantes.

Pelo contrário, os sistemas de controlo acústico-ACS usam menos canais, cerca de 12 e são capazes de criar um campo reverberante completamente novo. O facto de utilizar menos canais faz com que o seu custo seja mais reduzido do que o dos outros sistemas (Isbert, 1998).

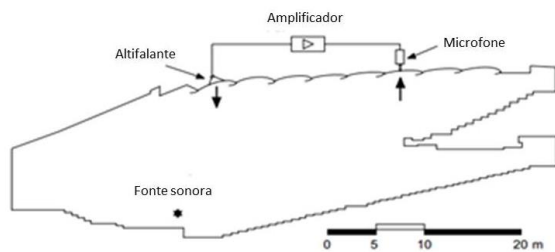


Figura 2.29- Esquema básico de um canal de um sistema de Ressonância Assistida (Isbert, 1998)

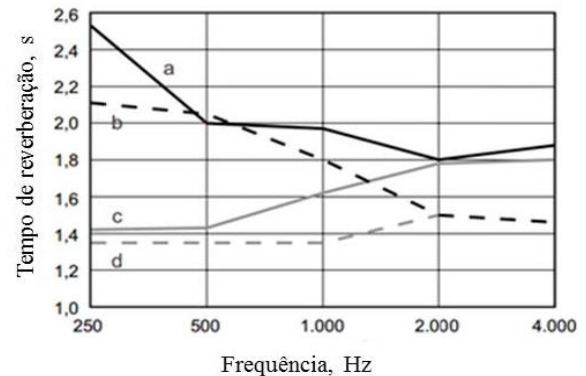


Figura 2.30- Tempos de reverberação do Royal Festival Hall de Londres (Grã Bretanha):
a) Ressonância Assistida conectada (sala vazia);
b) Ressonância Assistida conectada (sala ocupada);
c) Ressonância Assistida desconectada (sala vazia);
d) Ressonância Assistida desconectada (sala ocupada)
(Isbert, 1998)

A utilização de sistemas eletroacústicos com o objetivo de obter a reverberação desejada tem algumas vantagens e desvantagens, comparando com elementos físicos de acústica variável, apresentadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1- Vantagens e Desvantagens de sistemas eletroacústicos em relação a elementos físicos de acústica variável (Isbert, 1998)

Vantagens	Desvantagens
Obtenção de tempos de reverberação mais elevados, para o mesmo volume de compartimento	Risco do som parecer pouco natural
Maior capacidade de variação do tempo de reverberação consoante a utilidade do compartimento	Possível feedback entre microfones e altifalantes e, por isso, a ocorrência de um sinal sonoro inadmissível
Sistemas totalmente automatizados e, por isso de operação simples	Necessidade de manutenção e acompanhamento permanente por pessoas qualificadas
Sistemas geralmente mais baratos	Excelente funcionamento apenas se o espaço interior for desenhado acusticamente para a sua utilização

2.3. Métodos para determinação da absorção sonora em laboratório e in situ

Com o objetivo de relacionar o tempo de reverberação com a atenuação sonora do tratamento acústico em causa, é necessário ter em conta o coeficiente de absorção sonora. Existem alguns métodos de medição do coeficiente de absorção sonora em laboratório e in situ, apresentados nas seguintes secções.

2.3.1. Método do tubo de ondas estacionárias

O método do tubo de ondas estacionárias ou método do tubo de impedância é um dos métodos capaz de determinar a absorção sonora de materiais em laboratório. No entanto, para além da absorção sonora, este método permite determinar outras propriedades como a admitância e impedância acústica, bem como o fator de reflexão de materiais.

O princípio de medição da absorção sonora deste método consiste num tubo longo com um altifalante montado numa das suas extremidades e a amostra a ser testada na outra extremidade. O altifalante emite uma onda sonora no interior do tubo que incide na amostra e reflete, causando assim uma onda estacionária, isto é, uma sobreposição da onda incidente com a onda refletida. As pressões máxima e mínima dessa onda podem ser detetadas por um ou dois microfones, de acordo com a técnica adotada.

Existem duas técnicas possíveis de serem adotadas na medição do coeficiente de absorção sonora através do tubo de impedância. Uma é descrita na norma ISO 10534-1:1996 e baseia-se na deteção das pressões máxima e mínima de uma onda estacionária a uma determinada

distância da amostra a ser testada, através de um microfone movimentado ao longo do tubo, como ilustrado na Figura 2.31.

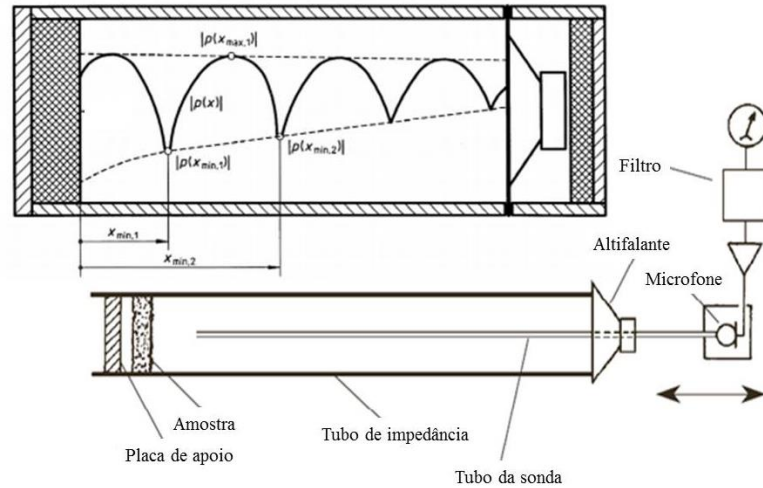


Figura 2.31- Construção e operação do tubo de impedância (adaptado de Everest e Pohlmann, 2009 e EN ISO 10534-1:1996)

A outra técnica é descrita na norma ISO 10534-2:1998 e tem os mesmos princípios de medição, isto é, a amostra é montada numa extremidade, o altifalante na outra e o microfone deteta as pressões mínima e máxima da onda estacionária. Contudo, estas duas técnicas têm duas principais diferenças.

Enquanto a primeira técnica utiliza apenas um microfone e mede uma faixa de frequências de cada vez, a técnica descrita na norma ISO 10534-2:1998 pode utilizar um ou dois microfones (ver Figura 2.32) e medir a faixa de frequências inteira de uma só vez.

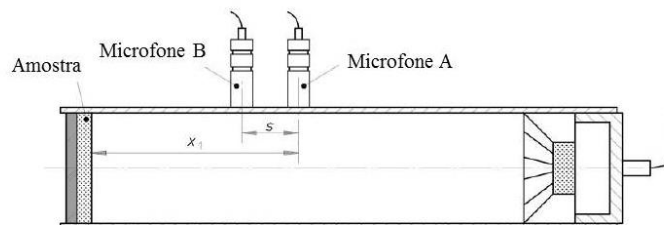


Figura 2.32- Método do tubo de impedância usando dois microfones (EN ISO 10534-2:1998)

Caso se use apenas um microfone, implica que se mova o microfone entre os dois pontos de medição mas, é eliminado um erro de medida inevitável, provocado pelas diferenças de um

par de microfones. Para além disso, com a utilização de um microfone, é possível escolher um ponto de medição numa faixa de frequência específica. Apesar disso, a norma recomenda a utilização de dois microfones uma vez que, torna o método mais rápido, preciso e fácil de implementar (ISO 10534-2:1998).

O método do tubo de ondas estacionárias apresenta algumas vantagens e desvantagens descritas no Quadro 2.2.

Quadro 2.2-Vantagens e Desvantagens do Método do Tubo de ondas estacionárias

Vantagens	Desvantagens
Utilizado nos sectores de desenvolvimento de produtos	Resultados restritos à incidência normal de ondas planas
Além da curva de absorção pode obter-se outras grandezas úteis, principalmente a curva de impedância acústica	O tamanho das amostras é limitado à dimensão da secção transversal dos tubos, o que pode causar dificuldade na preparação das amostras
Resultados mais precisos e de maior reprodutibilidade	
Os tubos são dispositivos simples	

2.3.2. Método da câmara reverberante

O método de medição da absorção sonora em câmara reverberante é abordado pela norma NP EN ISO 354:2007. Este método é aplicável na medição dos coeficientes de absorção sonora de materiais absorventes utilizados no tratamento de paredes e de tetos, ou da área de absorção sonora equivalente de objetos, peças de mobiliário e elementos absorventes como pessoas.

O seu princípio geral de medição consiste na medição dos tempos de reverberação médios da câmara reverberante com e sem a amostra em estudo. Obtendo os tempos de reverberação, a absorção sonora equivalente do provete pode ser calculada recorrendo à fórmula de Sabine, o que faz com que, por vezes, o coeficiente de absorção sonora de uma amostra possa ser superior a 1, o que na realidade não acontece.

Para a realização dos ensaios é necessário cumprir alguns requisitos definidos na norma. A câmara reverberante precisa de ter um volume de pelo menos 150 m³ contudo, o valor do volume aconselhado é aproximadamente 200 m³. Caso o volume seja superior a 500 m³, a absorção sonora em altas frequências pode ser afetada, devido à absorção do ar. Para além

disso, a relação entre o comprimento da maior linha reta contida nos limites da câmara ($l_{máx}$) deve ser tal que (EN ISO 354:2007):

$$l_{máx} < 1,9V^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

onde, V é o volume da câmara reverberante em metros cúbicos.

O campo sonoro da câmara deve ser suficientemente difuso, normalmente conseguido através da utilização de difusores fixos, suspensos, ou refletores rotativos. A área máxima de absorção sonora equivalente de câmaras reverberantes é descrita no Quadro 1 da norma NP EN ISO 354:2007.

O provete de ensaio deve ter uma área entre 10 e 12 m². Quanto maior for a câmara, maior deverá ser a área do provete. Até mesmo, se a câmara tiver um volume superior a 200 m³, o limite superior para a área do provete, isto é, 12 m², deve ser multiplicado pelo fator $(\frac{V}{200 m^3})^{\frac{2}{3}}$. O provete deve ser retangular com uma relação entre a largura e o comprimento compreendida entre 0,7 e 1.

Relativamente à sua posição na câmara, o provete deve ser colocado a uma distância às paredes da câmara não inferior a 0,75 m. No entanto, é recomendável que qualquer um dos seus pontos diste em relação às paredes pelo menos 1 m e que os lados do provete não sejam colocados paralelos às paredes mais próximas da câmara, principalmente para evitar reflexões sucessivas.

No que diz respeito às condições atmosféricas, temperatura e humidade, estas podem influenciar os resultados das medições pelo que, devem ser semelhantes nas medições com a câmara vazia e com o provete, de modo a que a absorção do ar não afete significativamente as medições.

As medições devem ser efetuadas para bandas de um terço de oitava, especificadas na norma ISO 266 e apresentadas no Quadro 2.3. Contudo, podem efetuar-se medições adicionais fora deste intervalo de frequências mas, o rigor das medições pode ser difícil de conseguir, especialmente abaixo dos 100 Hz, devido à baixa densidade modal da câmara reverberante.

Quadro 2.3- Frequências centrais, em Hz, para as bandas de um terço de oitava (ISO 266)

100	125	160	200	250	315
400	500	630	800	1000	1250
1600	2000	2500	3150	4000	5000

Os resultados destes ensaios podem ajudar na comparação e elaboração de projetos de condicionamento acústico de espaços, nomeadamente, nas condições acústicas e no controlo de ruído.

Este método apresenta algumas vantagens e desvantagens (ver Quadro 2.4).

Quadro 2.4-Vantagens e Desvantagens do Método da Câmara reverberante

Vantagens	Desvantagens
Fornecer resultados mais coerentes à aplicação da teoria de acústica de salas	Altos custos. É necessário dispor de uma instalação de laboratório sofisticada.
Permite fazer medições em condições de campo difuso	Procedimentos de medição complexos e demorados.
Facilidade em obter as dimensões do provete regulamentares	

2.3.3. Ensaio in situ

O método de medição do coeficiente de absorção sonora in situ, descrito na norma ISO 13472-1 tem grande interesse quando se pretende medir este parâmetro acústico em espaços interiores já construídos. Este ensaio pode ser realizado numa sala comum, sendo essa uma das principais vantagens apresentadas no Quadro 2.5.

O ensaio consiste numa emissão de um sinal através de uma fonte sonora direcionada num ângulo de incidência desejado para a superfície a ser testada. A onda sonora incidente atravessa o microfone, colocado entre a fonte e a amostra, incide na amostra e reflete, atravessando novamente o microfone (ver Figura 2.33).

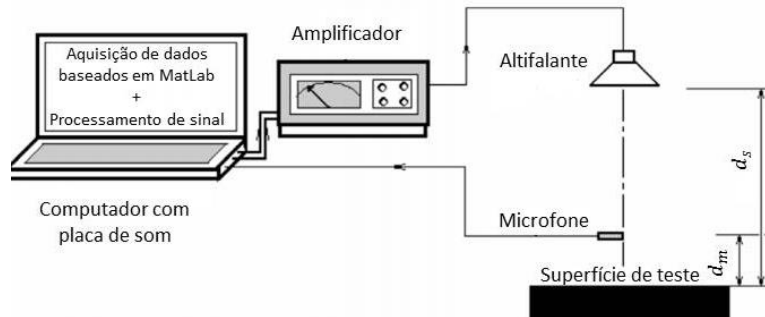


Figura 2.33-Instalação para a técnica de medição in situ equivalente à norma ISO 13472-1 (Londhe et al, 2009)

Os dois impulsos captados pelo microfone durante o processo são separados e utilizados para o cálculo dos coeficientes de reflexão e, posteriormente, de absorção.

O cálculo do coeficiente de absorção sonora pode ser obtido a partir das seguintes equações, contudo, o computador utilizado na medição facilita as curvas de absorção automaticamente (Londhe et al, 2009):

$$\alpha_i(f) = 1 - \frac{1}{\Delta f_i} \int_{f_i}^{f_i + \Delta f_i} |R(f)|^2 \cdot d_f \quad (3)$$

onde,

$\alpha_i(f)$ é o coeficiente de absorção para cada banda de 1/3 de oitava

f_i é a frequência inicial da banda de 1/3 de oitava

Δf_i é a largura da banda de 1/3 de oitava

O coeficiente de reflexão complexo, $R(f)$ é conseguido através de:

$$R(f) = \frac{1}{K_r^2} \left| \frac{H_r(f)}{H_i(f)} \right|^2 e^{K_r} = \frac{d_s - d_m}{d_s + d_m} \quad (4)$$

onde,

$H_r(f)$ e $H_i(f)$ são os espectros refletido e incidente respetivamente, obtidos por operações de FFT- Fast Fourier Transform

d_s é a distância entre o altifalante e a superfície a ser testada

d_m é a distância entre o microfone e a superfície a ser testada

Quadro 2.5- Vantagens e Desvantagens de Ensaio in situ

Vantagens	Desvantagens
Pode ser realizado numa sala comum	Complexidade do processamento
O equipamento de ensaio tem uma construção mais simples que a do tubo de impedância	Novidade da técnica de medição e da instrumentação necessária
Custos mais baixos	
Não há necessidade de preparação das amostras	
Exige um tempo menor do procedimento	

3. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODO

Com o objetivo de caracterizar as amostras em estudo quanto à absorção sonora, para posterior comparação e realização de projetos de condicionamento acústico do interior de compartimentos, recorreu-se ao método de medição da absorção sonora em câmara reverberante, não só por este método estar disponível no ITeCons, Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências de Construção, onde foram realizados os ensaios, mas também por ser o método mais indicado para a aplicação da teoria acústica de espaços interiores.

Os ensaios realizados neste estabelecimento são acreditados pelo IPAC, Instituto Português de Acreditação, cumprindo a norma de referência, NP EN ISO 354:2007.

3.1. Descrição da câmara reverberante

A câmara reverberante do ITeCons, utilizada nos ensaios, tem uma forma retangular em planta, com aproximadamente $5,85\text{m} \times 5,85\text{ m}$ e uma altura de $5,85\text{ m}$, perfazendo um volume de $203,98\text{ m}^3$.

Com estas dimensões, a câmara reverberante cumpre a norma que especifica que a câmara reverberante não deve ter um volume inferior a 150 m^3 e, deve ter um volume aproximadamente de 200 m^3 .

Cumprir também a condição da forma da câmara, uma vez que, sendo a altura de $5,85\text{m}$ e a largura da câmara aproximadamente $5,85\text{m}$, o comprimento da maior linha reta contida nos limites da câmara ($l_{m\acute{a}x}$) será aproximadamente $10,13\text{ m}$, menor que $11,11\text{ m}$ (ver Figura 3.1).

O valor de $l_{m\acute{a}x}$ foi obtido da seguinte forma. Sabendo que a câmara reverberante tem uma forma paralelepípedica, o valor de $8,27\text{ m}$ foi obtido recorrendo ao Teorema de Pitágoras:

$$8,27\text{ m} = \sqrt{5,85^2 + 5,85^2}\text{ m}$$

Da mesma forma que foi obtido o valor de $10,13\text{ m}$ para o valor de $l_{m\acute{a}x}$:

$$10,13\text{ m} = \sqrt{8,27^2 + 5,85^2}\text{ m}$$

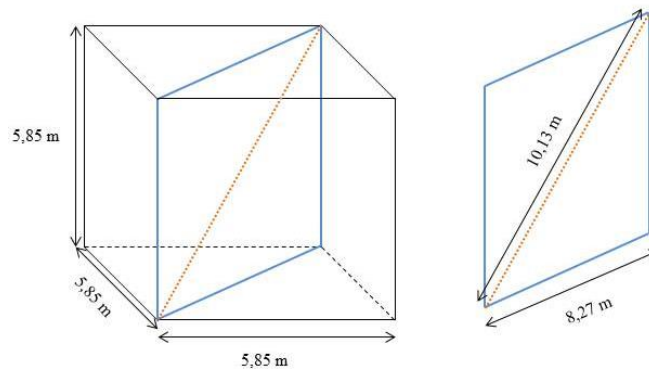


Figura 3.1-Esquema das dimensões da câmara reverberante utilizada nos ensaios

Durante os ensaios foram utilizados 15 elementos de difusão de polycarbonato transparente, com 5 mm de espessura e 30 m² de área total com o objetivo de garantir que o campo sonoro na câmara reverberante fosse suficientemente difuso.

Estes difusores têm diferentes geometrias, côncavas e convexas, e uma reduzida área de absorção. Estão colocados aleatoriamente no teto da câmara reverberante, com diferentes orientações, ajudando a criar um campo difuso e, para que as reflexões no interior da câmara sejam o mais uniformes possíveis (ver Figura 3.2).

Para além disso, de modo a reduzir o tempo de reverberação nas baixas frequências, a câmara de reverberação contém quatro caixas-de-ressonância forradas com telas (ver Figura 3.3).

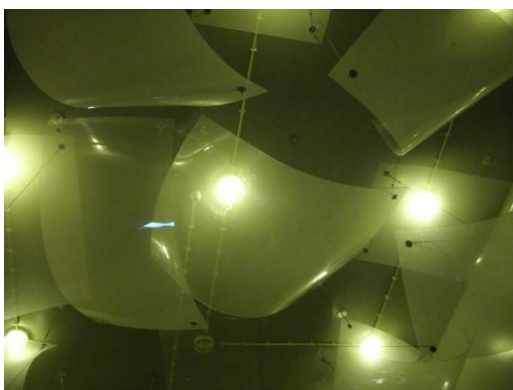


Figura 3.2- Difusores fixos, constituídos por painéis em polycarbonato, dispostos no teto da câmara reverberante



Figura 3.3- Caixas-de-ressonância forradas com telas

3.2. Descrição das amostras

O estudo da absorção sonora da cortiça combinada com espumas foi dividido em diversas fases. Na primeira fase foram realizados cinco ensaios com as amostras apoiadas sobre o pavimento, sem caixa-de-ar. Nesses cinco ensaios foi testada a absorção sonora de cinco amostras diferentes, correspondendo cada ensaio a um tipo de amostra, nomeadamente, um tecido com características de espuma e, por isso denominar-se-á, nesta dissertação, tecido espumoso e quatro espumas com 4cm de espessura, diferentes composições e diferentes massas volúmicas aparentes, ρ_{ap} (ver Figuras 3.4 a 3.8). Dessas quatro espumas foram selecionadas duas das mais eficientes relativamente à absorção sonora (ver secção 4.4).



Figura 3.4- Amostra E1



Figura 3.5- Amostra E2



Figura 3.6- Amostra E3



Figura 3.7- Amostra E4



Figura 3.8- Amostra E5

Na segunda fase combinaram-se duas das melhores espumas, em função dos resultados da fase anterior, com o tecido espumoso (ver Figuras 3.9 e 3.10), de modo a que se conseguisse perceber qual a influência que o tecido poderia ter na amostra final, isto é, se melhora a eficiência acústica do provete significativamente ou não afeta minimamente.

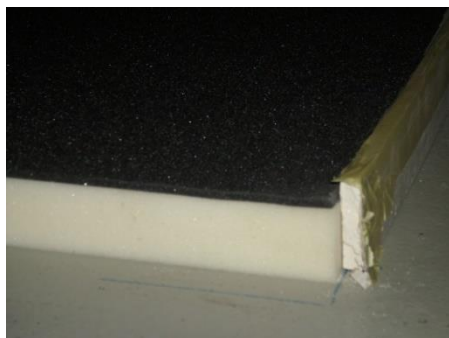


Figura 3.9- Amostra E6



Figura 3.10- Amostra E7

A terceira fase consistiu em caracterizar a absorção sonora do aglomerado de cortiça expandida. Para isso, mediram-se os coeficientes de absorção sonora dos aglomerados de cortiça expandida não perfurada, com 3cm de espessura, e perfurada, com 2,5cm de espessura e 5,5 cm de diâmetro dos furos. (ver Figuras 3.11 e 3.12).



Figura 3.11- Amostra E8



Figura 3.12- Amostra E9

De seguida, para continuar a avaliação intercalar das amostras, conjugou-se o aglomerado de cortiça expandida perfurada, com o tecido espumoso e com as duas espumas acústicas, selecionadas anteriormente, determinando desta forma o efeito que a cortiça causa na eficiência da absorção sonora das espumas acústicas (ver figuras 3.13 a 3.15).



Figura 3.13- Amostra E10



Figura 3.14- Amostra E11

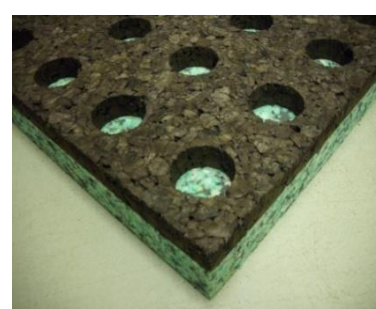


Figura 3.15- Amostra E12

Na última fase, com o objetivo de encontrar uma amostra ótima, combinou-se a cortiça com o tecido espumoso sobreposto às duas espumas eleitas na 1ª fase (ver Figuras 3.16 e 3.17)



Figura 3.16- Amostra E13



Figura 3.17- Amostra E14

No Quadro 3.1 apresenta-se um resumo com a designação e descrição das amostras ensaiadas.

Quadro 3.1- Descrição das amostras

	Amostra	Tipo de Amostra	Espessura (cm)	ρ_{ap} (kg/m ³)
1ª Fase	E1	Tecido espumoso	0,5	
	E2	Espuma de poliuretano ignífuga	4	43
	E3	Aglomerado de espuma de poliuretano	4	65
	E4	Espuma de poliuretano e gel	4	90
	E5	Aglomerado de espuma de poliuretano	4	98
2ª Fase	E6	Sobreposição de E1 a E2	4,5	-
	E7	Sobreposição de E1 a E3	4,5	-
3ª Fase	E8	Agl.de cortiça expandida não perfurado	3	106
	E9	Agl.de cortiça expandida perfurado	2,5	109
	E10	Sobreposição de E9 a E1	3	-

	E11	Sobreposição de E9 a E2	6,5	-
	E12	Sobreposição de E9 a E3	6,5	-
4ª Fase	E13	Sobreposição de E9 a E1 e E2	7	-
	E14	Sobreposição de E9 a E1 e E3	7	-

3.3. Descrição do equipamento

Na realização dos ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos, ilustrados nas Figuras 3.18 a 3.24:

- Equalizador, modelo dbx-131, da marca DBX
- Amplificador do tipo 2716, da marca “Bruel & Kjaer”;
- Sistema de aquisição multianalisador Pulse, modelo 3560-C-T46, da marca “Bruel & Kjaer, com cinco canais;
- Termo-higrómetro, THR09 com uma classe de exatidão de +/- 1°C e +/- 5% de humidade relativa;
- Fonte de ruídos aéreos, do tipo OMNIPOWER 4292, da marca “Bruel & Kjaer”;
- Microfone ½” do tipo 4190, montado em girafa giratória do tipo 3923, ambas da marca “Bruel & Kjaer”;
- Software usado para determinar as curvas de absorção sonora.
- Calibrador acústico, do tipo 4231, da marca “Bruel & Kjaer”;



Figura 3.18- Equalizador e Amplificador



Figura 3.19- Sistema de aquisição multianalisador Pulse



Figura 3.20- Termo-higrómetro



Figura 3.21- Fonte de ruídos
aéreos



Figura 3.22- Microfone
1/2''

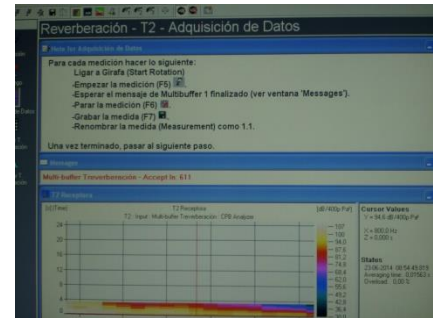


Figura 3.23- Software usado
para determinar as curvas de
absorção sonora



Figura 3.24- Calibrador acústico

3.4. Condições ambientais

As medições com a câmara vazia e com a câmara com o provete devem ser efetuadas em condições de temperatura e humidade relativa semelhantes, para que a absorção do som pelo ar não afete significativamente os ensaios, como fora referido anteriormente. Para além disso, quer num ensaio, quer noutra, a temperatura deve ser pelo menos de 15°C durante todo o ensaio e, a humidade relativa entre 30% e 90% (ver Quadro 3.2).

Quadro 3.2- Verificação das condições ambientais

Amostra	Temperatura (°C)		Humidade (%)		Verificação
	Ensaio s/ provete	Ensaio c/ provete	Ensaio s/ provete	Ensaio c/ provete	
E1	20,9	21	71,8	72,2	Cumpre
E2	21,5	21,6	67	66,8	Cumpre
E3	21,5	21,7	67	66,5	Cumpre

E4	21,5	21,4	67	66,7	Cumpre
E5	21,5	21,6	67	66,8	Cumpre
E6	20,2	20,6	67,3	69,9	Cumpre
E7	20,2	20,6	67,3	68	Cumpre
E8	23,1	22,7	55,3	57,2	Cumpre
E9	23,1	22,8	55,3	62,2	Cumpre
E10	23,1	22,8	55,3	59,5	Cumpre
E11	23,1	22,5	55,3	65,5	Cumpre
E12	23,1	22,6	55,3	58,7	Cumpre
E13	23,1	22,7	55,3	65,2	Cumpre
E14	23,1	22,9	55,3	56,6	Cumpre

3.5. Descrição do método

3.5.1. Montagem do provete

Uma vez que as amostras ensaiadas são elementos absorventes planos, segundo a norma, como já fora referido na secção 2.3.2, o provete deve ser retangular, com uma relação entre a largura e o comprimento entre 0,7 e 1 e ter uma área compreendida entre 10,0 m² e 12,2 m² (ver Quadro 3.3). Como o volume da câmara é superior a 200 m³, o limite superior normalizado, 12 m² é multiplicado pelo fator $(\frac{V}{200})^{\frac{2}{3}}$, obtendo então como limite superior de área, 12,2 m².

Quadro 3.3- Verificação de forma das amostras

Amostra	Área (10-12,2 m ²)	Largura/Comprimento	Verificação
E1	10,67	2,98/3,57=0,83	Cumpre
E2	12	3/4=0,75	Cumpre
E3	10,67	2,98/3,57=0,83	Cumpre
E4	10,80	3/3,6=0,83	Cumpre
E5	10,41	2,94/3,54=0,83	Cumpre
E6	12	3/4=0,75	Cumpre
E7	10,67	2,98/3,57=0,83	Cumpre
E8	11,63	3,06/3,67=0,83	Cumpre
E9	10,90	2,97/3,56=0,83	Cumpre
E10	10,57	2,97/3,56=0,83	Cumpre
E11	10,57	2,97/3,56=0,83	Cumpre
E12	10,57	2,97/3,56=0,83	Cumpre

E13	10,57	2,97/3,56=0,83	Cumpre
E14	10,97	2,97/3,56=0,83	Cumpre

Neste caso, com exceção do tecido espumoso, os provetes eram constituídos por mais que uma peça de material, ou seja, por painéis separados. De acordo com a montagem classificada como tipo "A" na norma NP EN ISO 354, pelo facto de o provete ser constituído por mais que uma peça de material poderia ser necessário cobrir as juntas entre as peças adjacentes com uma banda adesiva. No entanto, não foi necessário, pois, conseguiu-se unir perfeitamente os painéis do material, de modo a que não ocorresse o risco de absorção sonora nas extremidades laterais de cada uma das peças.

Os bordos do perímetro do provete foram selados com uma moldura acusticamente refletora, de gesso acústico com 12,5 mm de espessura, para que os seus bordos não absorvessem energia sonora pois, na sua aplicação real os bordos podem não se encontrar expostos. Para além disso, teve-se o cuidado de garantir que não existiam espaços de ar entre o provete e a moldura, e entre esta e a superfície da câmara, selando a moldura, com uma fita adesiva, tanto ao provete, como à superfície da câmara reverberante em todo o perímetro do provete.

3.5.2. Medição do tempo de reverberação

3.5.2.1. Verificações preliminares

Antes de iniciar as duas medições na câmara reverberante, com e sem provete, é necessário fechar portas ou outras aberturas existentes nas câmaras, verificar a inexistência de ruídos exteriores, registar as condições de humidade e temperatura no interior da câmara de ensaio, a superfície de absorção do provete e, também, a precisão dos microfones.

A precisão dos microfones é verificada antes e após a realização de cada ensaio, recorrendo ao calibrador acústico. Caso apareça a cor verde na janela da calibração do software de aquisição e controlo, os microfones estão calibrados.

Durante as medições, o interior da câmara reverberante deve estar vazio, à exceção do provete de ensaio, painéis difusores, girafa rotativa, fonte sonora e das quatro caixas-de-ressonância.

3.5.2.2 Posições do microfone e da fonte

Com o objetivo de cumprir o mínimo necessário exigido pela norma, o microfone giratório foi colocado em 3 posições de paragem, separadas de 120°. O facto do comprimento do “pescoço” do microfone ser de 1 m faz com que, a distância mínima de 1,5 m entre posições de microfones, exigida na norma tenha sido cumprida. Para além disso, foi cumprida a

distância mínima de 2 m de distância da fonte sonora e 1m das superfícies da câmara e do provete.

Por sua vez, a fonte sonora com radiação omnidirecional foi colocada em 4 posições distintas, separadas de 3 m, registando-se 3 decaimentos em cada posição do microfone, justificados na secção 3.5.2.3. Assim, para cada provete, foram realizadas 36 medições.

3.5.2.3. Produção de campo sonoro

A norma em vigor aconselha dois métodos para a medição de curvas de decaimento: o método do ruído interrompido e o método da resposta impulsiva integrada. No primeiro método, a curva de decaimento medida advém de um processo estatístico, sendo necessário calcular a média de várias curvas de decaimento, ou tempos de reverberação, medidos para uma posição de fonte/microfone de forma a obter uma repetibilidade adequada.

Pelo contrário, a resposta impulsiva integrada de um dado compartimento, é uma função determinística sem tendência a desvios estatísticos, não sendo necessário calcular médias. É, por isso, necessário equipamento e métodos de processamento mais sofisticados do que os utilizados no primeiro método.

Nos ensaios laboratoriais optou-se por utilizar o primeiro método, o método do ruído interrompido e uma fonte sonora que emite um som de espectro contínuo de banda larga. Neste método, a fonte sonora pode emitir um som de espectro contínuo de banda larga ou banda estreita. No caso da banda larga, o espectro não apresenta diferenças nos níveis de pressão superiores a 6 dB em bandas de um terço de oitava adjacentes. Caso se utilizasse um ruído de banda estreita, a largura da banda devia ser pelo menos um terço de oitava.

O som deve ser produzido por uma fonte sonora de ruído estacionário, constituída por vários altifalantes, de modo a garantir um campo sonoro uniforme e omnidirecional. Antes de ser interrompido, o sinal de excitação deve ser suficientemente longo, para produzir níveis de pressão sonora constantes nas várias bandas de frequências.

Segundo a norma NP EN ISO 354, neste método, deve fazer-se 3 medições em cada posição da fonte sonora, com o objetivo de obter valores médios, reduzindo a incerteza das medições, causadas pelos desvios estatísticos. Para calcular a média dos valores existem dois métodos.

Um dos métodos baseia-se no cálculo da média das curvas de decaimento para cada posição de fonte/microfone através da seguinte fórmula:

$$L_p(t) = 10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{\frac{L_{pn}(t)}{10}} \right] \quad (5)$$

onde,

$L_p(t)$ o nível de pressão sonora médio, no instante t , calculado para um número total de N decaimentos

$L_{pn}(t)$ o nível de pressão sonora do decaimento de ordem n , no instante t .

Este método é denominado de “média de conjunto” e foi o método adotado nos ensaios. A curva de decaimento resultante é normalmente mais regular pois, é obtida a partir da média de várias curvas e não apenas de um registo de decaimento. Contudo, quando não for possível aplicar este método, pode recorrer-se ao segundo método em que se determina primeiro o tempo de reverberação em cada uma das curvas de decaimento individuais, calculando posteriormente uma média aritmética.

Por fim, para o cálculo do tempo de reverberação, o método mais conveniente é calcular uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, na gama de avaliação. No entanto, o cálculo da média das curvas de decaimento e o cálculo do tempo de reverberação são realizados automaticamente pelo software usado durante o ensaio.

4. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO

4.1. Cálculo e expressão dos resultados do coeficiente de absorção sonora, α_s

4.1.1. Avaliação do tempo de reverberação baseada em curvas de decaimento

A avaliação da curva de decaimento para cada banda de frequência especificada anteriormente deve começar 5 dB abaixo do nível de pressão sonora inicial. A gama de avaliação deve ser 20 dB. O nível inferior da gama de avaliação deve ser pelo menos 10 dB superior ao ruído de fundo global do sistema de medição.

4.1.2. Cálculo dos tempos de reverberação T_1 e T_2

O tempo de reverberação da câmara reverberante, em cada banda de frequências, é expresso a partir da média aritmética do número total de medições do tempo de reverberação em cada banda de frequências, como referido anteriormente.

Os tempos de reverberação médios sem e com o provete, respetivamente T_1 e T_2 , em cada banda de frequências, devem ser calculados e expressos, no mínimo, com duas casas decimais.

4.1.3. Cálculo de A_1 , A_2 e A_T

O primeiro passo para o cálculo das curvas de absorção é determinar a área de absorção sonora equivalente A_1 , em metros quadrados, da câmara reverberante vazia. Esta deve ser calculada de acordo com a expressão:

$$A_1 = \frac{55,3V}{c_1 T_1} - 4Vm_1 \quad (6)$$

onde,

V é o volume da câmara reverberante vazia, em metros cúbicos;

c_1 é a velocidade de propagação do som no ar, em metros por segundo;

T_1 é o tempo de reverberação da câmara vazia, em segundos;

m_1 é o coeficiente de atenuação devido à presença do ar, em metros recíprocos.

Para temperaturas entre 15 e 30°, c_1 pode ser calculada pela expressão:

$$c_x = 331 + 0,6t \quad (7)$$

onde,

t é a temperatura do ar em graus Célsius.

O coeficiente de atenuação devido à presença do ar, m_1 é calculado de acordo com a ISO 9613-1, usando as condições climáticas observadas durante a medição com a câmara reverberante vazia e, partindo do coeficiente de atenuação atmosférica, α' , referido na ISO 9613-1:

$$m_1 = \frac{\alpha'}{10\log(e)} \quad (8)$$

A área de absorção sonora equivalente A_2 , em metros quadrados, da câmara reverberante contendo o provete de ensaio, calculou-se usando a expressão:

$$A_2 = \frac{55,3V}{c_2T_2} - 4Vm_2 \quad (9)$$

onde,

c_2 e V têm o significado referido anteriormente;

T_2 é o tempo de reverberação, em segundos, da câmara com o provete de ensaio;

m_2 é o coeficiente de atenuação de potência, em metros recíprocos, calculado de acordo com a ISO 9613-1, usando as condições climáticas observadas durante a medição com a câmara reverberante vazia e pode ser calculado de acordo com a expressão:

$$m_2 = \frac{\alpha'}{10\log(e)} \quad (10)$$

A área de absorção sonora equivalente A_T , em metros quadrados, do provete de ensaio, calculou-se com a seguinte fórmula:

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,3V \left(\frac{1}{c_2T_2} - \frac{1}{c_1T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1) \quad (11)$$

Normalmente, como as condições ambientais de ensaio antes e após a colocação do provete são idênticas, a correção do parâmetro m_n é irrelevante.

4.1.4. Cálculo de α_s

Segundo a norma NP EN ISO 354, o coeficiente de absorção sonora α_s de um elemento absorvente plano, ou de um conjunto de objetos distribuídos regularmente, calcula-se usando a expressão:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (12)$$

onde,

A_T é a área de absorção sonora equivalente do provete de ensaio, em metros quadrados

S é a área, em metros quadrados, do provete de ensaio.

4.2. Cálculo e expressão dos resultados do coeficiente de absorção sonora ponderado, α_w

O coeficiente de absorção sonora ponderado traduz num valor os coeficiente de absorção sonora dependentes das frequências. Este coeficiente é útil para formular exigências e descrever propriedades acústicas de produtos de absorção do som utilizados muitas vezes em escritórios, salas de aula, hospitais, entre outros locais de interesse.

O cálculo é realizado de acordo com a norma ISO 11654:1997(E) e é apenas aconselhável quando a gama de interesse é a gama completa do espectro de frequências. Caso exista uma gama de frequências específica de interesse, onde se deseja que o provete absorvente atue, deve-se ter em conta apenas o coeficiente de absorção, α_s .

Esta norma pode ser aplicada a todos os produtos de construção para a qual o coeficiente de absorção sonora tenha sido determinado em conformidade com a norma ISO 354. No entanto, não é adequado para peças individuais, tais como cadeiras, baffles, nem é aplicável a barreiras acústicas e superfícies de estrada.

Para o cálculo desta propriedade é necessário ter conhecimento de outros parâmetros tais como, coeficiente de absorção sonora prático, α_{pi} , definido como o valor do coeficiente de absorção sonora dependente das frequências, baseado em medições em bandas de um terço de oitava de acordo com a norma ISO 354 e que é calculado em bandas de oitava de acordo com a norma ISO 11654.

4.2.1. Cálculo de α_{pi}

$$\alpha_{pi} = \frac{(\alpha_{i1} + \alpha_{i2} + \alpha_{i3})}{3} \quad (13)$$

onde,

α_{pi} é o coeficiente de absorção sonora prático para cada banda de oitava i

α_{ix} é o coeficiente de absorção sonora para cada banda de um terço de oitava ix

Tal como o coeficiente de absorção sonora, o valor máximo de α_{pi} é 1. No entanto, é calculado para a segunda casa decimal e arredondado em incrementos de 0,05.

4.2.2. Cálculo de α_w

Para calcular a média ponderada de absorção sonora é necessário ter em conta o parâmetro anterior, α_{pi} e a curva de referência apresentada na Figura 4.1.

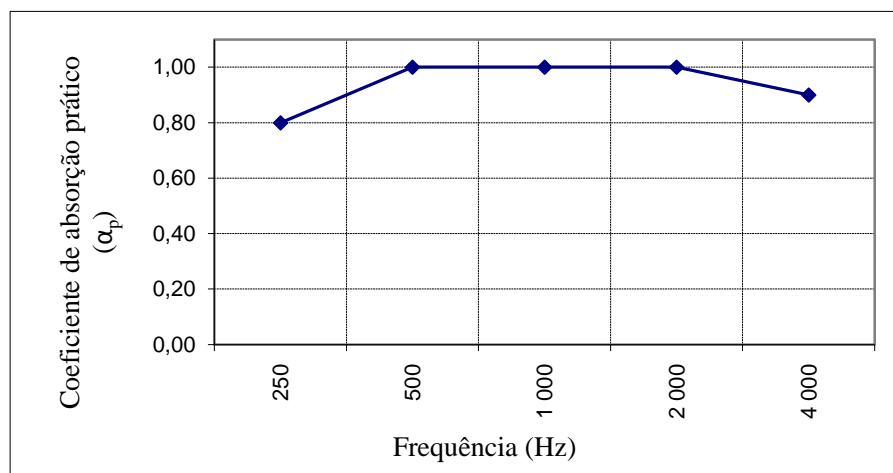


Figura 4.1- Curva de referência para avaliação do coeficiente de absorção ponderado, α_w (ISO 11654:1997 (E))

O método consiste em deslocar a curva de referência verticalmente em incrementos de 0,05 até que a soma dos desvios desfavoráveis em relação aos valores medidos de α_{pi} seja inferior ou igual a 0,10. Um desvio desfavorável ocorre quando numa frequência, o valor medido for menor que o valor da curva de referência e, apenas esses valores devem ser contabilizados.

O coeficiente de absorção ponderado, α_w corresponde ao valor da curva de referência deslocada, ou ajustada na frequência de 500 Hz.

Sempre que um coeficiente de absorção sonora prático exceder 0,25 ou mais o valor da curva de referência deslocada, um ou mais indicadores de formato da curva, L, M, ou H são adicionados entre parêntesis ao valor de α_w . Caso o excesso de absorção ocorra na faixa de frequências de 250 Hz, usa-se a notação L. Se o excesso ocorrer nas frequências de 500 e 1000 Hz, usa-se a letra M. Se pelo contrário, o excesso acontecer nos 2000 ou 4000 Hz, usa-se a notação H.

4.3. Cálculo e expressão dos resultados do coeficiente de redução de ruído, *NRC*

O coeficiente de redução de ruído, *NRC*, tem como objetivo avaliar propriedades acústicas de pavimentos, revestimentos e outros materiais. Este coeficiente indica a capacidade que uma determinada superfície tem em absorver o som incidente em todos os ângulos em diferentes frequências.

O *NRC* consiste na média aritmética da absorção sonora nas quatro frequências de 250, 500, 1000 e 2000 Hz, arredondada para um múltiplo de 0,05, como descrito na seguinte equação e, pode ser calculado de acordo com a norma ASTM C 423:

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} \quad (14)$$

O *NRC* é expresso entre 0 e 1, quanto mais próximo de 1, maior a capacidade absorvente da superfície. Por exemplo um *NRC* igual a 0,6 significa que a superfície absorve uma média de 60% do som incidente.

No Quadro 4.1 estão classificadas as classes de absorção sonora de materiais consoante a absorção sonora ponderada e o coeficiente de redução de ruído.

Quadro 4.1- Classes de absorção sonora

Classe de absorção sonora	Classe de absorção (norma VDI 3755/2000)	Absorção sonora ponderada α_w (ISO 11654:1997(E))	<i>NRC</i>
A	Extremamente absorvente	0,90; 0,95; 1,00	$\geq 0,75$
B	Extremamente absorvente	0,80; 0,85	
C	Altamente absorvente	0,60; 0,65; 0,70; 0,75	$0,5 \leq NRC < 0,75$
D	Absorvente	0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55	

E	Pouco absorvente	0,25; 0,20; 0,15	$0,25 \leq NRC < 0,5$
Não Classificado	Refletora	0,10; 0,05; 0,00	$NRC < 0,25$

4.4. Resultados

Numa primeira fase ensaiaram-se o tecido espumoso (amostra E1) e as quatro espumas acústicas isoladamente, espuma de poliuretano ignífuga, aglomerado de espuma de poliuretano com massa volúmica aparente de 65kg/m^3 , espuma de poliuretano e gel e aglomerado de espuma de poliuretano com massa volúmica aparente de 98kg/m^3 (amostras E2 a E5 respetivamente). As curvas de absorção sonora obtidas estão ilustradas na Figura 4.2 em bandas de frequência de 1/3 de oitava, entre as bandas de 100 Hz e 5000 Hz. No Quadro 4.2 apresentam-se os coeficientes de absorção sonora ponderada e o coeficiente de redução de ruído (α_w e NRC), juntamente com a classe de absorção sonora de cada amostra.

Ao observar as curvas de absorção sonora das amostras pode-se concluir que todas as amostras, por serem materiais porosos, apresentam maior absorção sonora nas altas frequências.

A absorção sonora do tecido espumoso (amostra E1), comparada com a das restantes amostras é notoriamente mais baixa talvez devido à sua reduzida espessura. Nota-se ainda que, a amostra de espuma de poliuretano e gel (E4) é eficiente numa banda mais larga de frequências, isto é, nas médias e baixas frequências é notoriamente mais absorvente que as restantes amostras, o que faz com que a sua classe de absorção sonora seja superior à dos restantes provetes (ver Quadro 4.2). Este facto pode dever-se à estrutura da amostra, uma vez que apresenta reentrâncias que poderão fazer com que atue como um ressoador de Helmholtz e, por isso, absorver o som nas frequências mais baixas.

Esta espuma poderia ser uma das melhores caso, quando fosse aplicada, ficasse completamente exposta ao ar. Contudo, como as espumas serão combinadas com a cortiça e com o tecido espumoso a estrutura com reentrâncias perderia parte do seu efeito pois, não estaria exposta diretamente ao som.

Através da análise da Figura 4.2, pode verificar-se também que uma das melhores amostras é a amostra de espuma de poliuretano ignífuga (E2), sendo a sua absorção sonora superior à das restantes amostras na maioria do espectro de frequências.

Entre os aglomerados de espuma de poliuretano (amostras E3 e E5), a única diferença é a massa volúmica do material, pelo que os dois ensaios foram realizados apenas com o objetivo de comparar as duas espumas no que diz respeito à absorção sonora.

Nota-se que nas baixas frequências as duas espumas têm praticamente a mesma absorção sonora, diferenciando-se ligeiramente apenas nas altas frequências, sendo E5, mais densa, mais eficiente do que a segunda, como seria de esperar (ver secção 2.2.1).

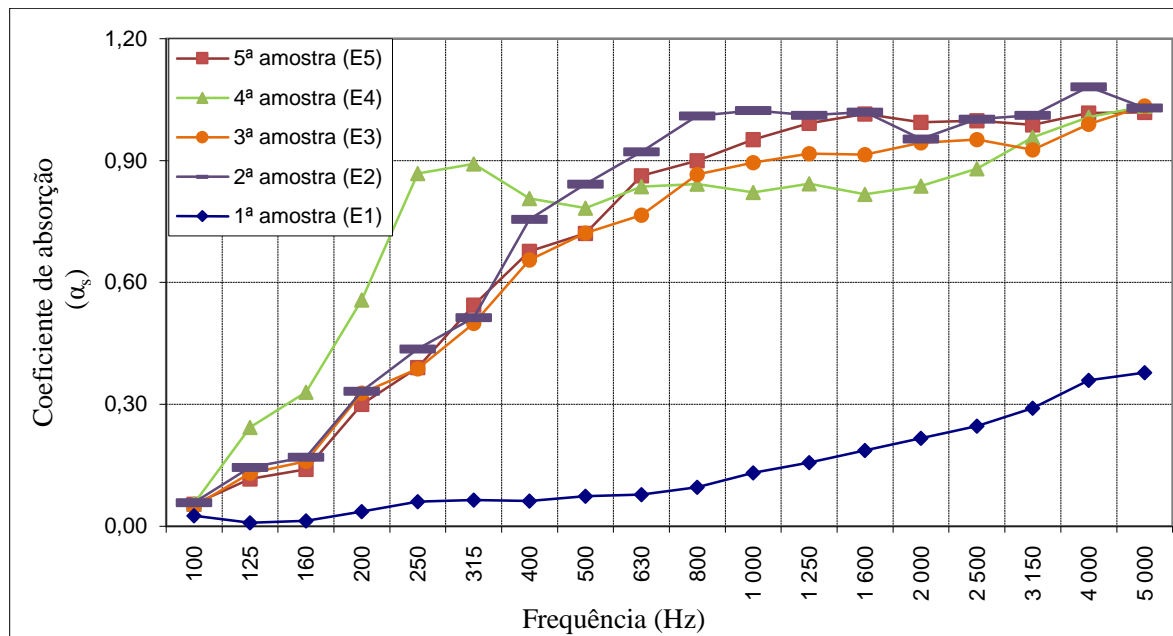


Figura 4.2- Resultados dos ensaios realizados na primeira fase (amostras E1, E2, E3, E4 e E5)

Quadro 4.2- Classes de absorção sonora das amostras ensaiadas (E1, E2, E3, E4 e E5)

Amostra	α_w	NRC	Classe de absorção (norma VDI 3755/2000)	Classe de absorção sonora
1ª (E1)	0,1(H)	0,1	Reflexiva	Não Classificada
2ª (E2)	0,7(MH)	0,75	Altamente Absorvente	C
3ª (E3)	0,7(H)	0,7	Altamente Absorvente	C
4ª (E4)	0,8(H)	0,75	Extremamente Absorvente	B
5ª (E5)	0,7(H)	0,75	Altamente Absorvente	C

Para as combinações a estudar na segunda fase, escolheram-se as espumas E2 e E3. Uma vez eleitas duas das melhores espumas para absorver o som, procedeu-se à realização da segunda fase dos ensaios, fazendo a combinação das duas espumas com o tecido espumoso, tendo-se obtido os resultados apresentados nas Figuras 4.3 a 4.5 e Quadros 4.3 a 4.6.

O objetivo desta fase era perceber que efeito o tecido espumoso poderia causar na absorção sonora das amostras de espuma. Pela observação das figuras correspondentes aos resultados

dos ensaios, verifica-se que a absorção sonora do tecido espumoso por si só não é muito elevada, talvez devido ao facto do tecido espumoso ter uma pequena espessura, como referido anteriormente. Contudo, através das Figuras 4.3 e 4.4 nota-se que o tecido tem um efeito positivo ao ser combinado com as amostras de espuma, isto é, quer na amostra de espuma de poliuretano ignífuga (E2), quer na amostra do aglomerado de espuma de poliuretano (E3) a absorção sonora é ligeiramente aumentada pela sobreposição do tecido espumoso sobre as amostras.

Através da Figura 4.3 e dos Quadros 4.3 e 4.4 verifica-se que, apesar de não existir uma grande diferença nas curvas de absorção sonora, ocorrendo o maior aumento de absorção sonora nas frequências 315 e 630 Hz, a amostra resultante da sobreposição do tecido espumoso (E1) com a espuma de poliuretano ignífuga (E2) apresenta uma classe de absorção sonora superior à classe de absorção sonora da espuma de poliuretano ignífuga isoladamente.

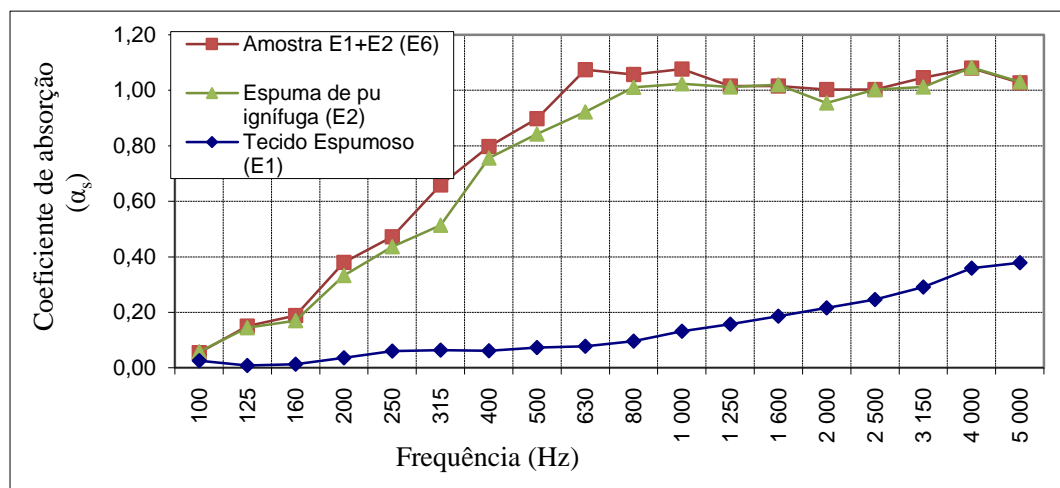


Figura 4.3- Resultados da combinação das amostras E1 e E2 (E6)

Quadro 4.3- Valores de α_s das amostras ensaiadas E2 e E6

	E2	E6
f(Hz)	α_s	
100	0,06	0,05
125	0,14	0,15
160	0,17	0,19
200	0,33	0,38
250	0,44	0,47

315	0,51	0,66
400	0,76	0,80
500	0,84	0,90
630	0,92	1,07
800	1,01	1,06
1000	1,02	1,08
1250	1,01	1,02
1600	1,02	1,02
2000	0,95	1,00
2500	1,00	1,00
3150	1,01	1,04
4000	1,08	1,08
5000	1,03	1,03

Quadro 4.4- Classes de absorção sonora das amostras ensaiadas (E1, E2 e E6)

Amostra	α_w	<i>NRC</i>	Classe de absorção (norma VDI 3755/2000)	Classe de absorção sonora
E1	0,1(H)	0,1	Reflexiva	Não Classificada
E2	0,7(MH)	0,75	Altamente Absorvente	C
E6	0,8(H)	0,85	Extremamente Absorvente	B

Através da Figura 4.4 e do Quadro 4.6 nota-se que, apesar dos coeficientes de absorção sonora da amostra resultante da sobreposição do tecido espumoso (E1) ao aglomerado de espuma de poliuretano (E3) apresentarem valores superiores em relação à amostra de aglomerado de espuma de poliuretano isoladamente, em toda a gama de frequências, não há uma subida de classe de absorção sonora.

No Quadro 4.5 estão representados a negrito os valores das frequências (315 e 1250 Hz) onde existe maior diferença na absorção sonora entre as amostras E3 e E7.

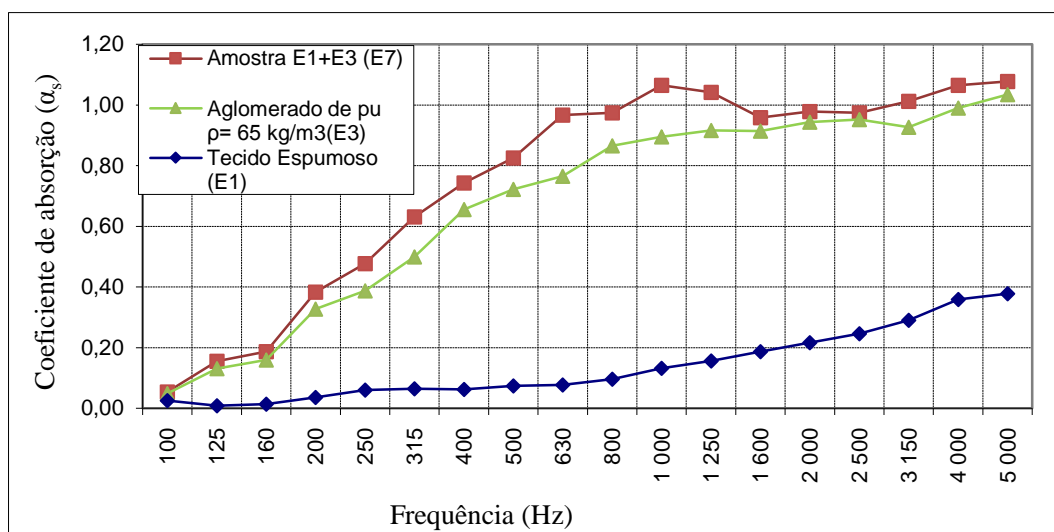


Figura 4.4- Resultados da combinação das amostras E1 e E3 (E7) - segunda fase

Quadro 4.5- Valores de α_s das amostras ensaiadas E3 e E7

	E3	E7
f(Hz)	α_s	
100	0,05	0,05
125	0,13	0,16
160	0,16	0,19
200	0,33	0,38
250	0,39	0,48
315	0,50	0,63
400	0,66	0,74
500	0,72	0,83
630	0,77	0,97
800	0,87	0,97
1000	0,89	1,07
1250	0,92	1,04
1600	0,91	0,96
2000	0,94	0,98
2500	0,95	0,97
3150	0,93	1,01
4000	0,99	1,07
5000	1,03	1,08

Quadro 4.6- Classes de absorção sonora das amostras ensaiadas (E1, E3 e E7)

Amostra	α_w	NRC	Classe de absorção (norma VDI 3755/2000)	Classe de absorção sonora
E1	0,1(H)	0,1	Reflexiva	Não Classificada
E3	0,7(H)	0,7	Altamente Absorvente	C
E7	0,75(H)	0,8	Altamente Absorvente	C

Na Figura 4.5 apresentam-se as curvas de absorção das duas amostras de espumas selecionadas, após a sobreposição do tecido espumoso. Ao analisar a figura, verifica-se que para frequências baixas, 100 a 315 Hz as curvas de absorção das duas amostras estão sobrepostas, apresentando semelhante absorção sonora. Este comportamento já se verificava quando as amostras foram ensaiadas separadamente (ver Figura 4.2).

Nas médias e altas frequências, de 315 a 5000 Hz, a amostra E6 oferece melhor absorção sonora, exceto nas frequências 1250 e 5000 Hz em que a absorção sonora da amostra E7 é ligeiramente superior a E6.

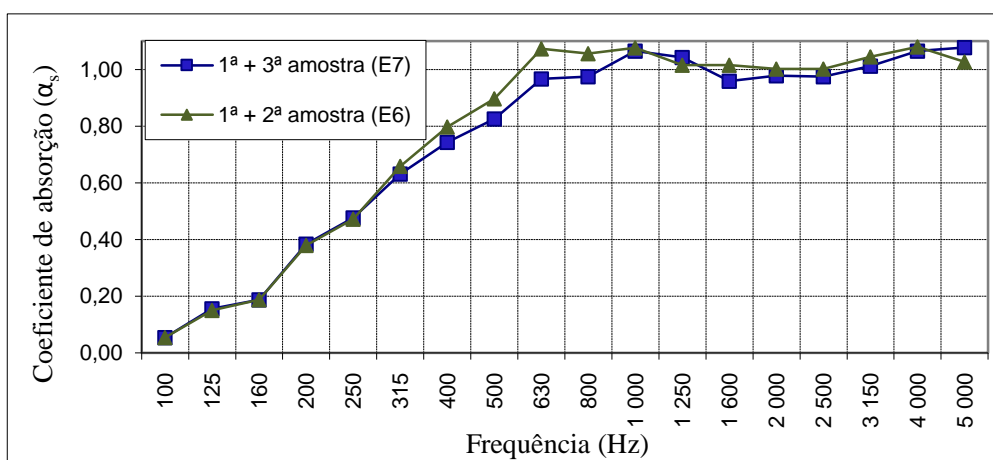


Figura 4.5- Comparação das duas melhores espumas acústicas após a sobreposição do tecido espumoso

A terceira fase consistia em caracterizar a absorção sonora do aglomerado de cortiça expandida. Para isso, ensaiou-se o aglomerado de cortiça expandida não perfurada e o aglomerado de cortiça expandida perfurado, isoladamente, obtendo os resultados ilustrados na Figura 4.6.

Através da Figura 4.6 pode verificar-se que a absorção sonora do aglomerado de cortiça perfurado (E9) é inferior à absorção sonora do aglomerado de cortiça não perfurado (E8) até à banda de frequências de 1250 Hz. Isto talvez porque, apesar da área de absorção sonora da cortiça perfurada ser superior à área de absorção sonora da cortiça simples, devido à área lateral de cada perfuração, esta área não se encontra diretamente exposta ao som, dificultando a absorção sonora. Para além disso, nota-se que o pico de absorção sonora da amostra E8 para a amostra E9 desloca-se para frequências mais altas.

Da análise do Quadro 4.7 pode verificar-se que ambas as amostras pertencem à classe E, de absorção sonora (pouco absorvente) no entanto, o coeficiente de absorção sonora ponderado é superior no aglomerado de cortiça expandida não perfurado.

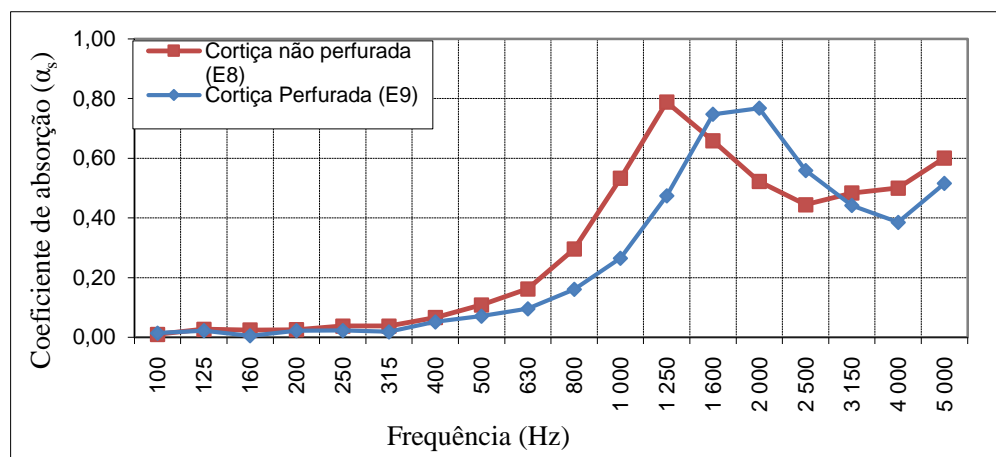


Figura 4.6- Resultados dos ensaios E8 e E9

Quadro 4.7- Classes de absorção sonora das amostras ensaiadas (E8 e E9)

Amostra	α_w	<i>NRC</i>	Classe de absorção (norma VDI 3755/2000)	Classe de absorção sonora
E8	0,20(MH)	0,25	Pouco Absorvente	E
E9	0,15(H)	0,25	Pouco Absorvente	E

De seguida, para continuar a avaliação intercalar das amostras, conjugou-se o aglomerado de cortiça expandida perfurado (E9), com o tecido espumoso (E1) e com as duas espumas acústicas selecionadas, espuma de poliuretano ignífuga (E2) e aglomerado de espuma de poliuretano (E3), determinando, desta forma, o modo de melhorar a absorção sonora da cortiça, associando-a a outros materiais absorventes (ver Figuras 4.7 a 4.9 e Quadros.4.8 e 4.9).

Observando a Figura 4.7 nota-se que o tecido espumoso (E1), quando combinado com a amostra de aglomerado de cortiça expandida perfurado, faz aumentar a absorção sonora do aglomerado de cortiça expandida perfurado isoladamente (E9). No entanto, apesar da absorção sonora ser superior, as duas curvas têm uma configuração semelhante.

Ainda pela Figura 4.7 é possível verificar que nas baixas e médias frequências a absorção sonora do aglomerado de cortiça expandida perfurado (E9) aumenta consideravelmente, quando combinada com a espuma de poliuretano ignífuga (E2) e, com o aglomerado de espuma de poliuretano (E3). Nas altas frequências, os coeficientes de absorção sonoros das amostras E11 e E12 continuam a ser superiores a E9, exceto nas frequências de 1600 e 2000 Hz.

Recorrendo ao Quadro 4.8, certifica-se que a classe de absorção sonora do aglomerado de cortiça expandida perfurado aumenta (de E para C) quando combinada com as duas espumas selecionadas.

Através dos ensaios da terceira fase, conclui-se que a configuração do aglomerado de cortiça expandida perfurado com o tecido e com as espumas, melhora o desempenho do aglomerado de cortiça expandida perfurado isolado.

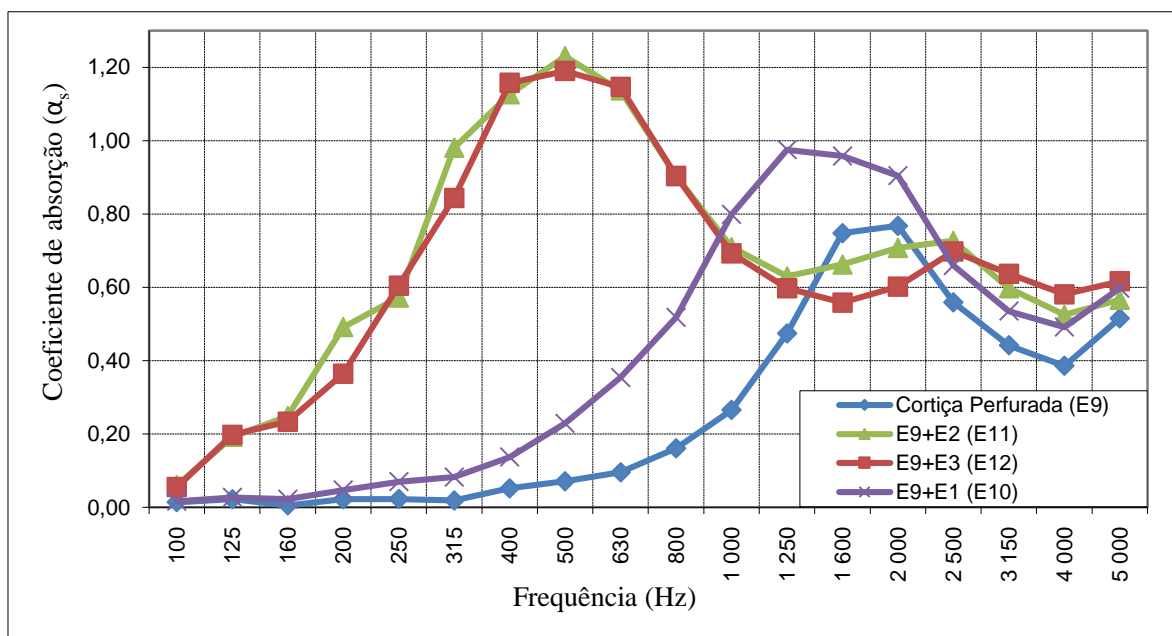


Figura 4.7- Resultados dos ensaios E9, E10, E11 e E12

Quadro 4.8- Classes de absorção sonora das amostras ensaiadas (E9, E10, E11 e E12)

Amostra	α_w	NRC	Classe de absorção (norma VDI 3755/2000)	Classe de absorção sonora
E2	0,7(MH)	0,75	Altamente Absorvente	C
E3	0,7(H)	0,7	Altamente Absorvente	C
E9	0,15(H)	0,25	Pouco Absorvente	E
E10	0,25(MH)	0,45	Pouco Absorvente	E
E11	0,7(M)	0,75	Altamente Absorvente	C
E12	0,7(M)	0,75	Altamente Absorvente	C

A diferença de absorção sonora das amostras combinadas de cortiça e espumas, E11 e E12, registada na Figura 4.8, poderá ser causada pela diferença da eficiência de absorção sonora das espumas E2 e E3 isoladamente. Para além disso, analisando a figura conclui-se que, a utilização da cortiça não melhora a absorção sonora das espumas para altas frequências. Contudo, o objetivo deste estudo não se baseia na melhoria da absorção sonora das espumas acústicas, mas na melhoria de absorção sonora de painéis de cortiça expandida.

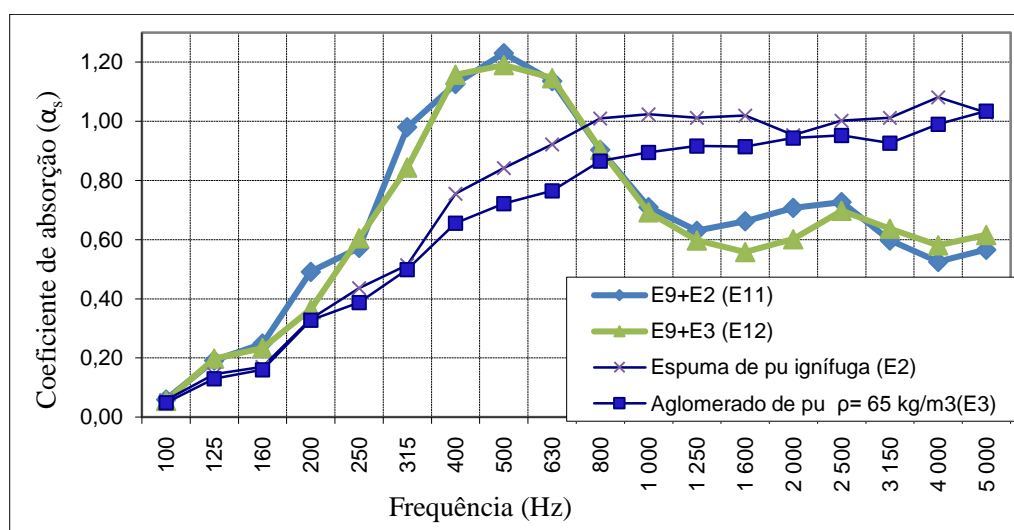


Figura 4.8- Resultados comparativos das espumas com a cortiça perfurada e isoladamente (E2,E3,E11 e E12)

Na última fase, com o objetivo de encontrar uma amostra ótima, combinou-se a cortiça com o tecido espumoso sobreposto às duas espumas eleitas na 1ª fase. Os resultados dos ensaios que associam o aglomerado de cortiça expandida perfurado com o tecido espumoso sobreposto à espuma de poliuretano ignífuga (E13) e, o aglomerado de cortiça expandida perfurado com o

tecido espumoso sobreposto ao aglomerado de espuma de poliuretano (E14) apresentam-se na Figura 4.9. Também na Figura 4.9, comparam-se as amostras E13 e E14 com o aglomerado de cortiça expandida não perfurado (E8), de modo a observar a melhoria na absorção sonora atingida com a associação da cortiça com outros materiais absorventes, neste caso com espumas acústicas.

Recorrendo ao Quadro 4.9 conclui-se que as duas soluções ótimas têm um coeficiente de absorção sonora ponderado de 0,7 e um coeficiente de redução de ruído de 0,8, sendo por isso altamente absorventes, pertencendo à classe de absorção sonora C.

Resumidamente, pode concluir-se que, em termos de absorção sonora, é muito mais vantajoso usar a combinação do aglomerado de cortiça expandida perfurada com as espumas e o tecido do que a cortiça não perfurada a revestir as superfícies. Este tipo de solução, além de melhorar a absorção sonora original do aglomerado de cortiça expandida, permite, através de diferentes configurações de perfuração, obter soluções esteticamente interessantes (ver Figura 4.10)

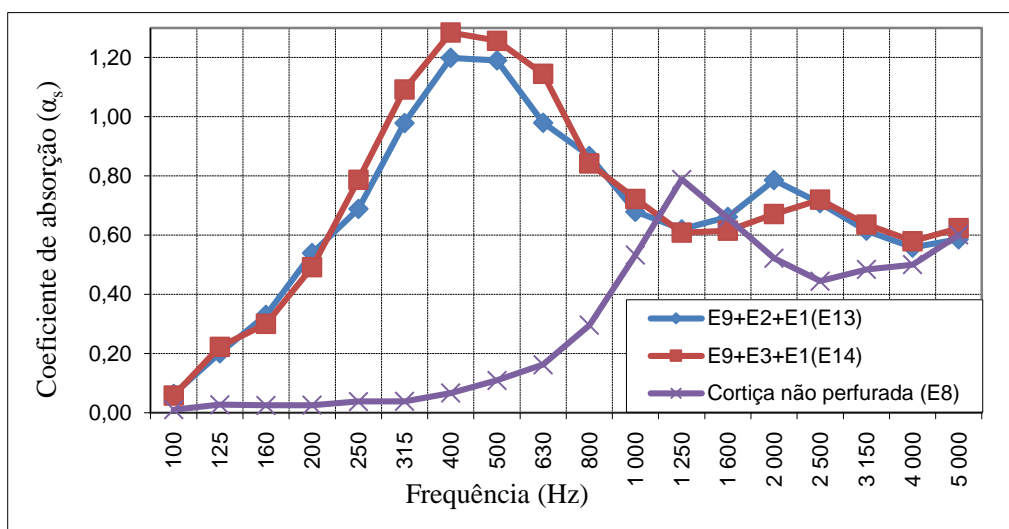


Figura 4.9- Resultados dos ensaios E9, E11, E12, E13 e E14

Quadro 4.9- Classes de absorção sonora das amostras ensaiadas (E9, E11 e E12, E13 e E14)

Amostra	α_w	<i>NRC</i>	Classe de absorção (norma VDI 3755/2000)	Classe de absorção sonora
E9	0,15(H)	0,25	Pouco Absorvente	E
E11	0,7(M)	0,75	Altamente Absorbente	C

E12	0,7(M)	0,75	Altamente Absorbente	C
E13	0,7(M)	0,8	Altamente Absorbente	C
E14	0,7(LM)	0,8	Altamente Absorbente	C



Figura 4.10- Painéis de cortiça com diferentes configurações de perfurações, esteticamente atraentes

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

A construção civil é um sector chave para o desenvolvimento e sustentabilidade económica e social. Contudo, é também um dos principais sectores causadores de impactes ambientais negativos, principalmente devido ao excesso de utilização de recursos naturais e produção de resíduos. É, por isso, essencial criar estratégias que minimizem, ou se possível, eliminem os impactes ambientais causados por este sector.

Outro aspeto importante para a realização desta dissertação foi a qualidade acústica de edifícios ser cada vez mais uma preocupação do ser humano. No mercado existem inúmeros materiais e sistemas capazes de garantir as condições mínimas de conforto acústico em espaços interiores. No entanto, a maioria destes materiais são produzidos recorrendo a materiais sintéticos, excessivamente utilizados, contribuindo desta forma para o excesso de utilização de recursos naturais e produção de resíduos não biodegradáveis.

Atualmente, têm sido desenvolvidos vários estudos com o objetivo de verificar a possibilidade de utilizar materiais sustentáveis na construção civil, como a cortiça, ou reciclar materiais como pneus, que no fim da sua vida útil, quando mal geridos, causam problemas ambientais.

A presente dissertação tinha como objetivo principal desenvolver uma solução acústica ótima no controlo da reverberação em edifícios, que utilizasse um material de origem natural e fosse esteticamente agradável. Esta solução consiste em associar um aglomerado de cortiça expandida (100% natural e altamente produzida em Portugal), a espumas acústicas, com aplicabilidade, por exemplo, em moradias, home-cinemas, escritórios, hotéis, auditórios, estúdios, escolas de música, museus e bibliotecas.

Numa primeira fase determinou-se, em laboratório, a absorção sonora de quatro espumas acústicas e um tecido espumoso. Em função dos resultados obtidos escolheram-se duas das melhores espumas, espuma de poliuretano ignífuga e aglomerado de espuma de poliuretano com $\rho_{ap}=65 \text{ kg/m}^3$ (E2 e E3 respetivamente). Ao combinar estas espumas com o tecido espumoso verificou-se que a absorção sonora melhora ligeiramente, apesar do tecido (devido à reduzida espessura) ter uma absorção sonora baixa.

Na terceira fase ensaiaram-se o aglomerado de cortiça expandida perfurado com as duas espumas selecionadas e com o tecido espumoso. Através das curvas de absorção sonora verificou-se que a absorção da cortiça sofria uma melhoria com a sobreposição da cortiça ao tecido espumoso e que, com a combinação com as espumas acústicas a absorção sonora nas baixas frequências aumenta consideravelmente.

Finalmente, na última fase obtiveram-se duas soluções ótimas para atuarem como absorventes sonoros, aglomerado de cortiça expandida perfurado associado com tecido espumoso e espuma de poliuretano ignífuga (E13) e aglomerado de cortiça expandida perfurado associado com tecido espumoso sobreposto ao aglomerado de espuma de poliuretano com $\rho_{ap} = 65 \text{ kg/m}^3$. Estas soluções têm como principais vantagens o facto de incluírem um material natural e sustentável, serem duráveis e, o seu design ser personalizável aos interesses de cada utilizador.

Adicionalmente, este tipo de soluções permite melhorar o desempenho (em termos de absorção sonora) do aglomerado de cortiça expandida isolado.

5.2. Trabalhos Futuros

Após a realização deste estudo surgem algumas sugestões de trabalhos futuros:

- Estudar a influência que uma caixa-de-ar teria na absorção sonora das amostras estudadas;
- Estudar a influência de outra geometria na perfuração, podendo tornar as amostras esteticamente mais atraentes;
- Estudar a associação do aglomerado de cortiça expandida com outros materiais, nomeadamente fibras naturais (algodão, lã de ovelha, fibra de coco, fibras de sisal entre outros).

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

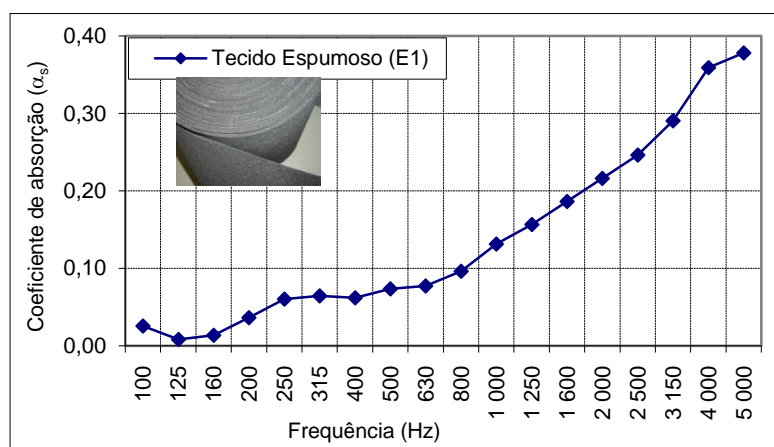
- AECWEB@ (2014). http://www.aecweb.com.br/prod/e/la-de-vidro_21212_12482.
Arquitetura Engenharia e Construção.
- AEP. (2011). “Manual de Gestão Ambiental de Obras de Construção Civil - Projeto BenchMark A+E”, Associação Empresarial de Portugal.
- AKUSTIKE@ (2014).
http://www.akustike.fr/gen/baffles_acoustiques/baffles_acoustiques_31/baffles_acoustiques_suspendues_61.htm. Empresa de soluções completas para o controle de ruído (página internet oficial), Paris.
- AMORIM@ (2014). www.sustentabilidade.amorim.com. Programa Escolha Natural Sustentável por Natureza. Portugal.
- António, J. (2012). “Acústica Ambiental”. Apontamentos da disciplina, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- APCOR@ (2014). http://www.apcor.pt/userfiles/File/Publicacoes/Manual_MCD_PT.pdf.
Manual Técnico-Materiais de Construção e Decoração. Portugal.
- ARCHIPRODUCTS@ (2014). <http://www.archiproducts.com>. The worldwide source for architecture & design products. Portugal.
- Bastos, L. (2010). “Qualidade Acústica de Auditórios”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- BASWAPHON@ (2014). http://www.baswaphon.com/white_paper.html. Seamless Sound Absorbing Plaster System. América do Norte.
- Boer, L. e Schrotten, A. (2007). “Traffic noise reduction in Europe- Health effects, social costs and technical and policy options to reduce road and rail traffic noise”. Pesquisa independente especializada no desenvolvimento de soluções estruturais e inovadoras para os problemas ambientais. Delft, Holanda.
- Cowan, J. (1993). “Handbook of Environmental Acoustics”. New York, U.S.A.
- Cox, T., D’Antonio, P. (2009). “Acoustic Absorbers and Diffusers”. Oxford. UK.
- Doelle, L. (1972). “Environmental Acoustics”. Seattle, WA, U.S.A.
- Domingues, O. (2005). “Acústica nos edifícios materiais e sistemas absorventes sonoros coeficientes de absorção sonora”. LNEC, Lisboa, Portugal.
- Eires, R. (2006). “Materiais não Convencionais para uma Construção Sustentável Utilizando Cânhamo Industrial, Pasta de Papel e Cortiça”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Minho.
-

-
- EMBALAPLAST@ (2014). <http://www.embalaplast.com.br/pu.php>. Empresa que produz comercializa e desenvolve embalagens plásticas, técnicas, industriais, para a protecção dos mais diversos produtos (página internet oficial), Brasil.
- Everest, F., Pohlmann, K. (2009). “Master Handbook of Acoustics”. U.S.A.
- Ferreira, R. (2010). “Comportamento Acústico de Componentes da Construção à Base de Aglomerado de Fibras de Madeira e Cimento”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, Porto.
- Flach, F. (2012). “Investigação do Potencial de Absorção Acústica de Compósitos de Argamassa com Materiais Reciclados”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, Brasil.
- FRASMIL@ (2014). <http://www.frasmil.com.br/produtos.php>. Empresa de isolamentos térmicos (página internet oficial), Brasil.
- Isbert, A. (1998). “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”. Barcelona, Espanha.
- ISO 10534-1:1996 EN Acoustics- Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes- Part 1: Method using standing wave ratio (ISO 10534-1:1996), ISO, Genebra, Suíça, 1996.
- ISO 10534-2:1998 EN Acoustics- Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes- Part 2: Transfer function method (ISO 10534-2:1998), ISO, Genebra, Suíça, 1998.
- ISO 11654:1997 EN Acoustics- Sound absorbers for use in buildings- Rating of sound absorption (ISO 11654:1997), ISO, Genebra, Suíça, 1997.
- ISO 12472-1:2002 EN Acoustics- Measurements of sound absorption properties of road surfaces in situ- Part 1: Extended surface method (ISO 12472-1:2002), ISO, Genebra, Suíça, 2002.
- ISO 266:1997 EN Acoustics- Preferred Frequencies (ISO 266:1997), ISO, Genebra, Suíça, 1997.
- ISO 354:2007 NP EN Acústica- Medição da absorção sonora em câmara reverberante (NP EN ISO 354:2007), IPQ, Caparica, Portugal, 2007.
- ISOVER@ (2014). http://www.ateliedogesso.com.br/catalogo_isover.pdf. Guia Residencial- Isolantes termoacústicos em lã de vidro.
- Jadir, T., Lima, M. (2009). “Propriedades Acústicas de Materiais de Construção para Uso em Edificações no Entorno de Aeroportos”. 15º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XV ENCITA, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil.
- JPSCORK@ (2014). <http://www.jpscorkgroup.com/>. Empresas estruturadas em áreas de negócio para a gestão eficaz do negócio da cortiça. Portugal.
- LABCON@ (2014). <http://www.labcon.ufsc.br/anexosg/390.pdf>. Laboratório de Conforto Ambiental (página internet oficial), Brasil.
-

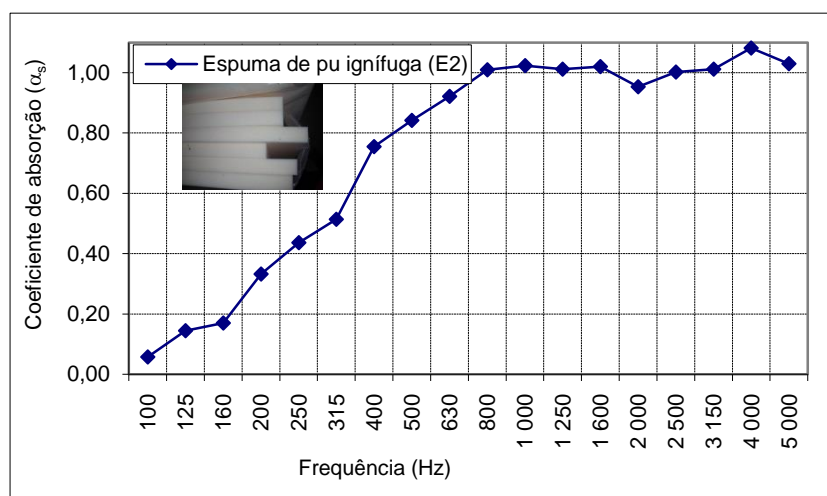
-
- LOGACUSTICA@ (2014). <http://logacustica.com/coeficientes-de-absorcao-sonora-sound-absorption-coefficients/>. Empresa especializada em Acústica, Ruído e Vibrações. Vilar do Senhor, Portugal.
- Londhe, N., Rao, M., Blough, J. (2009). “Application of the ISSO 13472-1 in situ technique for measuring the acoustic absorption coefficient of grass and artificial turf surfaces”. Elsevier, Vol. 70, pp. 129-141.
- Martins, G. (2008). “Caracterização Acústica de Materiais Fonoabsorventes à Base de Filmes de Polímero Monocomponentes sobre Lã Mineral Fibrada”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, Porto.
- Mateus, D. (2008). “Acústica de Edifícios e Controlo de Ruído”. Apontamentos da disciplina, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Mateus, S. (2012). “Construção Sustentável-Materiais eco eficientes para a melhoria do desempenho de edifícios”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Oldham, D., Egan, C., Cookson, R. (2011). ” Sustainable acoustic absorbers from the biomass”. Applied Acoustics , Vol. 72, pp. 350–363.
- Pinheiro, M. (2006). “Ambiente e Construção Sustentável”, Instituto do Ambiente, Amadora, Portugal.
- Putra, A., Abdullah, Y., Efendy, H., Farid, W., Ayob, M., Py, M. (2013). “Utilizing Sugarcane Wasted Fibers As A Sustainable Acoustic Absorber”. Procedia Engineering, Vol. 53, pp. 632-630.
- Rodrigues, P. (2008). “Interacção Engenharia Civil/ Acústica com Base na Validação Experimental de Modelos de Desempenho - Baffles Acústicos”. Relatório de Projecto de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, Porto.
- Silva, A. (2012). “A Aplicação de Materiais Sustentáveis na Redução de Ruído”. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Silva, C. (2013). “O Tempo de Reverberação e a Inteligibilidade da Palavra”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Porto, Porto.
- Tadeu, A., Mateus, D., António, J., Godinho, L., Mendes, P. (2007). “Acústica Aplicada”. Apontamentos da disciplina, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Yang, H., Kim, D., Lee, Y., Kim, H., Jeon, J., Kang, C. (2004). “Possibility of using waste tire composites reinforced with rice straw as construction materials”. Bioresource Technology, Vol. 95, pp. 61-65.
-

ANEXO A – RESULTADOS DOS ENSAIOS LABORATORIAIS

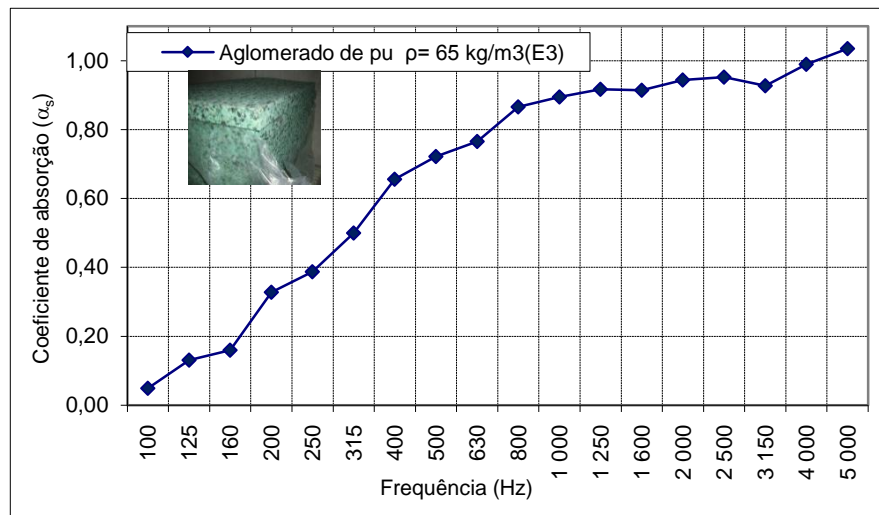
Amostra E1	f(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
	α_s	0,03	0,01	0,01	0,04	0,06	0,06	0,06	1,07	0,08	0,10
	f(Hz)	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000		
	α_s	0,13	0,16	0,19	0,22	0,25	0,29	0,36	0,38		



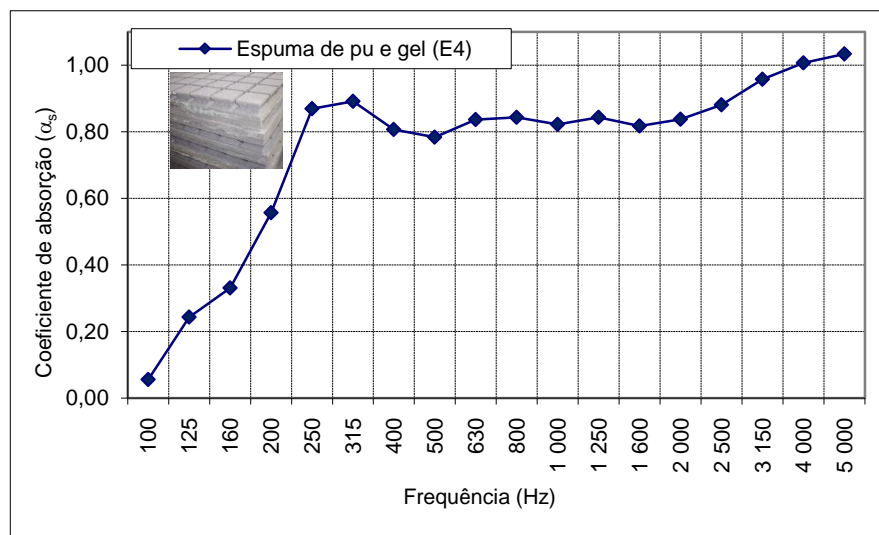
Amostra E2	f(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
	α_s	0,06	0,14	0,17	0,33	0,44	0,51	0,76	0,84	0,92	1,01
	f(Hz)	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000		
	α_s	1,02	1,01	1,02	0,95	1,00	1,01	1,08	1,03		



Amostra E3	f(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	
	α_s	0,05	0,13	0,16	0,33	0,39	0,50	0,66	0,72	0,77	0,87	
	f(Hz)	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000			
	α_s	0,89	0,92	0,91	0,94	0,95	0,93	0,99	1,03			



Amostra E4	f(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	
	α_s	0,06	0,24	0,33	0,56	0,87	0,89	0,81	0,78	0,84	0,84	
	f(Hz)	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000			
	α_s	0,82	0,84	0,82	0,84	0,88	0,96	1,01	1,03			



Amostra E5	f(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
	α_s	0,05	0,12	0,14	0,30	0,39	0,54	0,68	0,72	0,86	0,90
	f(Hz)	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000		
	α_s	0,95	0,99	1,01	0,99	1,00	0,99	1,02	1,02		

